

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Новосибирск  
2021

Всероссийская научная  
конференция молодых ученых,  
посвященная году науки и технологий в России

# НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

Сборник  
научных трудов

Часть 10

г. Новосибирск, 06 – 10 декабря 2021 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

---

# **НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ**

---

---

**XV Всероссийская научная конференция молодых  
ученых, посвященная Году науки и технологий в России  
г. Новосибирск, 06-10 декабря 2021 г.**

**Сборник научных трудов  
в 10-и частях**

**Часть 10**

НОВОСИБИРСК  
2021

УДК 62(063)  
ББК 72.5я431  
Н34

**Н34 НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ:** XV Всероссийская научная конференция молодых ученых, посвященная Году науки и технологий в России (г. Новосибирск, 06-10 декабря 2021 г.) // Сборник научных трудов в 10 ч. / Под ред. Соколовой Д.О. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021.

ISBN 978-5-7782-4562-4  
Часть 10: – 283 с.  
ISBN 978-5-7782-4572-3

В сборнике опубликованы материалы научных исследований, представленных на XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России.

В части 1 сборника представлены материалы по направлению «Информатика, автоматика, вычислительная и измерительная техника». В части 2 сборника представлены материалы по направлению «Информационные технологии математического моделирования и обработки данных». В части 3 сборника представлены материалы по направлению «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств. Материаловедение, технологические процессы и аппараты». В части 4 сборника представлены материалы по направлению «Энергетика». В части 5 сборника представлены материалы по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». В части 6 сборника представлены материалы по направлению «Электроника и биомедицинская техника». В части 7 сборника представлены материалы по направлению «Экономика и управление». В частях 8 и 9 сборника представлены материалы по направлению «Гуманитарные науки и современность». В части 10 сборника представлены материалы по направлению «Актуальные проблемы авиаракетостроения».

---

---

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

### **Председатель Оргкомитета:**

Батаев А.А., д.т.н., профессор, ректор НГТУ

### **Зам. председателя Оргкомитета:**

Брованов С.В., д.т.н., доцент, проректор по научной работе НГТУ

### **Программный комитет:**

Драгунов В.П., д.т.н., профессор, начальник ОПК ВК

Корель И.И., к.ф.-м.н., доцент, декан ФТФ

Осьмук Л.А., д.соц.н., профессор, директор ИСТР

Рева И.Л., к.т.н., доцент, декан АВТФ

Мелехина Е.А., к.п.н., доцент, декан ФГО

Саленко С.Д., д.т.н., профессор, декан ФЛА

Тимофеев В.С., д.т.н., доцент, декан ФПМИ

Овчинникова Н.Н. к.э.н., декан ФБ

Стрельцов С.А., к.т.н., доцент, декан РЭФ

Вильбергер М.Е., к.т.н., доцент, декан ФМА

Тюрин А.Г., к.т.н. доцент, декан МТФ

Русина А.Г., д.т.н. доцент, декан ФЭН

**УДК 62(063)**  
**ББК 72.5я431**

**ISBN 978-5-7782-4572-3 (Ч.10)**

© Коллектив авторов, 2021

**ISBN 978-5-7782-4562-4**

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2021

**Секция ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО  
И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Секция КОНСТРУКЦИЯ И ДЕЙСТВИЕ  
СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ И БОЕПРИПАСОВ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДЕГРАДАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО  
АППАРАТА ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**А.В. Родина, М.П. Калаев**

**Самарский национальный исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева, г. Самара, rodina.av@ssau.ru  
Научный руководитель: Пиганов М.Н., д.т.н., профессор**

*В настоящее время увеличиваются сроки службы космических аппаратов, разрабатываются новые материалы, при этом одной из проблем остается изучение изменения свойств поверхностных элементов, таких как солнечные батареи, при воздействии факторов космического пространства.*

*Currently, the service life of spacecraft is increasing, new materials are being developed, while one of the problems remains the study of changes in the properties of surface elements, such as solar batteries, under the influence of space factors.*

В настоящее время при оценке сроков функционирования космических аппаратов (КА) необходимо учитывать процессы, связанные с взаимодействием элементов конструкций КА и продуктов антропогенного загрязнения космоса. Источниками загрязнения являются выхлопы ракет, неотработанное топливо, обломки КА. При лабораторном моделировании эффектов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства необходимо иметь широкой набор микрочастиц и элементов КА.

На базе существующего линейного ускорителя [1] был разработан прототип лабораторного стенда для исследования многофакторного воздействия космической среды на образцы солнечных батарей. На рис. 1 представлена структурная схема лабораторного стенда с вариантом компоновки для исследования солнечных батарей.

Основой стенда является вакуумная камера с вводами для воздействующих факторов, а также креплениями под образцы исследуемых поверхностных элементов и средства контроля изменения параметров этих поверхностных элементов. Для формирования этих факторов служат линейный ускоритель микрометеороидов (ЛУ), тракт формирования атомарного кислорода (АК), электронно-лучевая пушка

(ЭЛП) для формирования пучка электронов. Каждый из перечисленных источников имеет собственный блок управления (БУ АК, БУ ЛУ, БУ ЭЛП), получающие команды от ЭВМ управления стендом. Непосредственно внутри вакуумной камеры размещены источники оптических излучений: галогеновые лампы (ГЛ) и мощные ультрафиолетовые светодиоды (УФ). При испытаниях солнечных батарей контролируются основные электрические характеристики солнечных батарей: ток короткого замыкания и напряжение холостого хода.

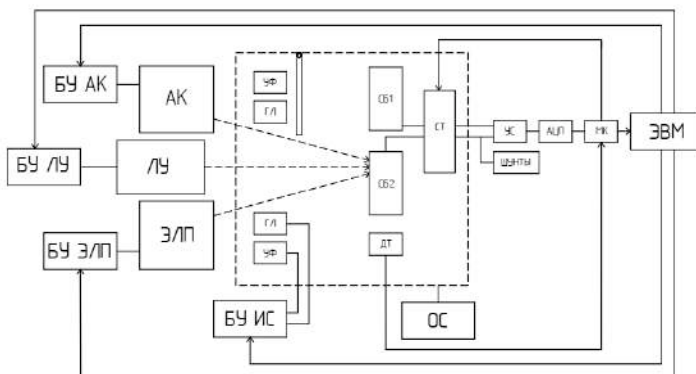


Рис.1 – Структурная схема лабораторного стенда для исследования солнечных батарей: ЛУ – линейный ускоритель; АК – источник атомарного кислорода; ЭЛП – электронно-лучевая пушка; УФ – источник ультрафиолетового излучения; ГЛ – галогеновая лампа; СБ1, СБ2 – солнечные батареи; ДТ – датчик температуры; СТ – система термостатирования; УС – усилитель сигнала; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; ЭВМ – компьютер; БУ АК – блок управления источником атомарного кислорода; БУ ЛУ – блок управления линейным ускорителем; БУ ЭЛП – блок управления электронно-лучевой пушкой; БУ ИС – блок управления источниками света; ОС – откачная система

Измерение показателей деградации производится в режиме реального времени с помощью измерительной системы, подключенной к внешней ЭВМ.

В результате исследований разработан стенд, а также методика для исследования образцов солнечных батарей при воздействии факторов космического пространства. Использование стенда позволит производить испытания солнечных батарей и их защитных покрытий, предназначенных для функционирования на околоземной орбите.

Литература:

1. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов / Н.Д. Семкин, А.В. Пияков, К.Е. Воронов, Н.Л. Богоявленский, Д.В. Горюнов // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 140–147.

2. Воздействие метеороидов и техногенных частиц на солнечные батареи космических аппаратов / А.Б. Надирадзе, М.П. Калаев, Н.Д. Семкин // Космические исследования. – 2016. – Т. 54, № 5. – С. 392–401.

3. Родина А.В. Исследование изменения характеристик фотоэлектрических преобразователей при воздействии факторов космического пространства // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 21-23 апреля 2020 г. – Самара: Изд-во ООО «Вектор», 2020. – С. 172–174.

## **СИЛОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

**Д.А. Замятин**

**Сибирский государственный университет науки и технологий им.  
академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск,  
zamyatin.denis2011@yandex.ru**

**Научный руководитель: Кольга В.В., д.п.н., к.т.н., профессор**

*Разработка конструкции антенны из полимерных композиционных материалов.*

*Designing composite support structure of antenna reflector*

Антенны рефлекторного типа на космических аппаратах (КА), как правило, имеют крупные габариты, и должны быть представлены трансформируемыми конструкциями. В связи с этим, одной из актуальных задач проектирования антенн КА является разработка конструкций, обеспечивающих раскрытие рефлектора. В большинстве случаев раскрытие является разовым, после чего рефлектор зачековывается в рабочем положении.

Целью данной работы является подтверждение прочности конструкции механизма выдвижения мачты (МВМ) рефлектора антенны и поиск путей оптимизации конструкции МВМ для рефлекторов диаметром до 12 м.

Описание конструкции

МВМ предназначен:

- для раскрытия рефлектора из транспортного положения в рабочее положение и складывания рефлектора в технологическом режиме из рабочего положения в транспортное;
- для жёсткой фиксации мачты в рабочем и транспортном положениях;
- для выдачи информации о состоянии контактных датчиков и об изменении нагрузки на МВМ от рефлектора.

В состав МВМ входят:

- электромеханический привод;
- мачта;
- фланцы для установки УПФР, для установки МВМ на рефлектор и для зачековки мачты;
- зубчатые рейки, установленные на ложемент мачты;
- опорные ролики для мачты;
- узел зачековки.

Механизм выдвижения мачты разработан на основе зубчатой передачи «колесо-рейка»:

В качестве мачты используется труба с закреплёнными на наружной поверхности накладками, которая базируется на корпусе МВМ на систему опор на основе жёстких и гибких роликов;

В качестве передачи, создающей осевое усилие на мачту МВМ, применена зубчатая рейка, находящаяся в контакте с зубчатым колесом последней ступени привода МВМ.

Электромеханический привод установлен на корпусе. Этот привод предназначен для преобразования вращательного движения зубчатого колеса через зубчатые рейки в линейное перемещение мачты из транспортного положения в рабочее положение и обратно. Зубчатые рейки установлены в ложемент на мачте.

В транспортном положении мачта вдвинута в обечайку. Упоры находятся в захватах, фиксируя мачту в осевом и радиальном направлениях.

Требования:

- Обеспечение осевого усилия: не менее 1200 Н на участке выдвижения мачты до 3500 мм; не менее 2500 Н на участке свыше 3500 мм
- Осевая нагрузка на мачту при движении в сторону рабочего положения от сопротивления элементов рефлектора – не более 1700 Н при постоянно действующей поперечной нагрузке – 30 Н
- Отклонение конца мачты в зоне фланца в рабочем положении в поперечном направлении под действием поперечной нагрузки – не

более 10 мм как минимум для двух взаимно перпендикулярных направлений

Механический анализ МВМ выполнен по КЭМ, разработанной на основании геометрической модели САТИА.

Механический анализ МВМ в транспортном положении включает в себя:

- расчёт на прочность от действия квазистатических нагрузок;
- расчёт на прочность от действия вибрационных нагрузок гармонической (синусоидальной) и случайной вибрации.

Механический анализ МВМ в рабочем положении включает в себя:

- расчёт на жёсткость при статическом нагружении мачты МВМ;
- расчёт на устойчивость;
- определение требований по локальной податливости мачты;
- расчёт на прочность мачты при выдвигении в рабочее положение.

Целью испытаний мачты рефлектора антенны космического аппарата (КА) является получение фактических значений прогибов при статических испытаниях.

Задачи испытаний:

- анализ полученных данных для выбора наиболее подходящих вариантов конструкции мачты при использовании её в составе механизма выдвигения мачты (МВМ);
- оценка изделия на соответствие техническому заданию (ТЗ);
- определение технического уровня;
- определение возможности поставки в производство [2].

Для создания и анализа расчётной модели используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в системе моделирования и конечно-элементного анализа в программном комплексе ANSYS.

В конечно-элементной модели объект заменяется дискретной моделью, которая представляет собой совокупность узлов и связанных с ними конечных элементов с заданными свойствами. Мачта с фланцами, обечайка и корпус моделируются оболочечными конечными элементами типа SHELL181. Стык обечайки и корпуса реализован объединением контактирующих узлов. Интерфейс с мачтой обеспечивается введением соответствующих уравнений связи в зоне зачехловки мачты в рабочем положении (по всем степеням свободы) и в зоне опоры на ролики у основания (по нормали к поверхности мачты).

В процессе моделирования на этапе геометрического построения поверхность мачты была разбита на поверхности, моделирующие элементы многослойной оболочки с конечными деформациями.



Граничные условия соответствуют закреплению посадочной плоскости рефлектора по всем степеням свободы.

При моделировании материала мачты как многослойного углепластика схема армирования задаётся согласно конструкторской документации (КД).

В составе МВМ цилиндрическая часть мачты подвергается одновременно сжимающей и изгибающей нагрузкам, что существенно осложняет задачу выбора оптимального углов намотки и количества слоёв угольного жгута, служащего наполнителем ПКМ мачты.

Выбором углов намотки определяется баланс между осевой и поперечной жёсткостью конструкции мачты, что влияет также на значение минимальной массы. При этом основным источником неравномерности распределения нагрузок является закреплённая вдоль корпуса мачты зубчатая рейка, служащая для приведения мачты в составе МВМ в рабочее положение. Наличие и расположение данного элемента существенно осложняет задачу расчёта, а также наводит на вопрос о целесообразности пересмотра конструкции мачты в целом.

### **Заключение**

Сформирована конечно-элементная модель силовой конструкции рефлектора антенны КА. Проведён предварительный анализ механических характеристик конструкции.

Следующим этапом конструирования мачты в составе МВМ рефлектора КА является предложение альтернатив конструкции; в разработке находятся модели силовой конструкции антенны с сетчатой структурой мачты и спиц рефлектора, а также с разным количеством зубчатых реек, после чего будет проведён конечно-элементный анализ альтернативных конструкций с граничными условиями в соответствии с установленными требованиями.

### **Литература**

1. Власенко А.В., Скрыбин В.В. Применения перспективных композиционных материалов для проектов ракетно-космической техники // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniya-perspektivnyh-kompozitsionnyh-materialov-dlya-proektov-raketno-kosmicheskoy-tehniki> (дата обращения: 09.02.2020).

2. Малышенко Александр Максимович, Майков Степан Александрович Методика определения относительных энергозатрат привода раскрытия рефлектора антенны зонтичного типа при наземных его испытаниях на стенде с активной системой обезвешивания //

Доклады ТУСУР. 2018. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-otnositelnyh-energozatr-at-privoda-raskrytiya-reflektora-antenny-zontichnogo-tipa-pri-nazemnyh-ego-ispytaniyah-na> (дата обращения: 09.02.2020).

3. Скворцов, Ю. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твёрдого тела [Электронный ресурс] : интерактивное мультимедийное пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (9,1 Мб). – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

## **ВНЕДРЕНИЕ ПЛАСТИКОВЫХ ПЭТ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКЦИЮ ХВОСТОВОГО ОПЕРЕНИЯ МОТОПЛАНЕРА «САРМА - 2»**

**А.А. Мешков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, alexsandermeshkov@mail.ru**

**Научный руководитель: Крюков А.В., к.т.н., доцент**

*За долгие годы своей эволюции самолет претерпел множество изменений, он стал комфортным и надежным. Инженеры выработали множество методик проектирования, благодаря которым достигаются высокие летные и прочностные характеристики. Однако за это же время конструкция самолета усложнилась, а его цена выросла. Самолет вновь начал становиться недоступным широкому кругу заинтересованных в нем людей.*

*В СКБ ФЛА НГТУ группа студентов под руководством преподавателей факультета занимается проектированием и изготовлением мотопланера «Сарма-2». Планируется за счет простоты конструкции и организации серийного выпуска снизить цену на ЛА, тем самым сделать его доступнее.*

*Over the years of its evolution, the aircraft has received many changes, it has become durable, comfortable and fast. But its price has gone up a lot. Students in the Student's Design Office of NSTU create and assemble glider «Sarma-2» under control of the teachers of the university. The basis of the technology is adhesive riveted aluminum bearing members and PET skinning with a wavy surface.*

Основными направлениями достижения доступности технических устройств и СЛА, в частности, являются: использование более доступных конструкционных материалов, упрощение и повышение безопасности технологических процессов, а также использование универсальной оснастки для производства. В данной публикации

представлен этап работ по проектированию и изготовлению нервюр и обшивки из ПЭТ пластика для хвостового оперения мотопланера «Сарма - 2».

Конструкция хвостового оперения состоит из неподвижных - стабилизатор и киль, и подвижных – руль высоты и руль направления, аэродинамических поверхностей (рис. 1). Принципиальная схема аэродинамических поверхностей идентична, рассмотрим ее на примере стабилизатора (рис. 2): лонжерон сборной конструкции 1, подкрепленный набором распорок 2, с внешней стороны стенки при помощи уголков 4 к лонжерону крепятся пластиковые ПЭТ нервюры 5, к которым приклеивается пластиковая волнистая обшивка 6, с внутренней стороны стенки устанавливаются узлы навески рулевых поверхностей 3.

Ввиду малого веса и низких скоростей полета нагрузка на элементы планера относительно низкая, именно этим обусловлена возможность применения подобного материала. ПЭТ очень выгодно выделяется своими механическими свойствами. В число преимуществ ПЭТ входят: доступность, цена, хорошая обрабатываемость, износостойкость при умеренной прочности и небольшом весе.

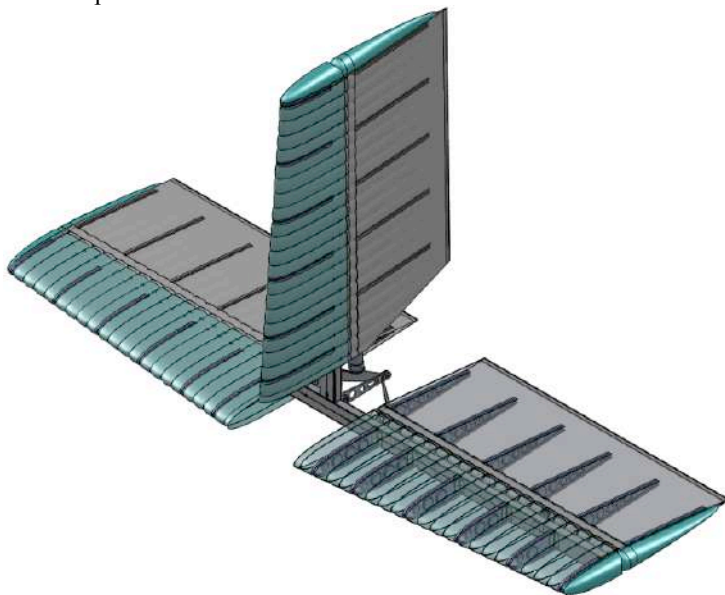


Рис. 1 – Хвостовое оперение мотопланера «Сарма – 2»

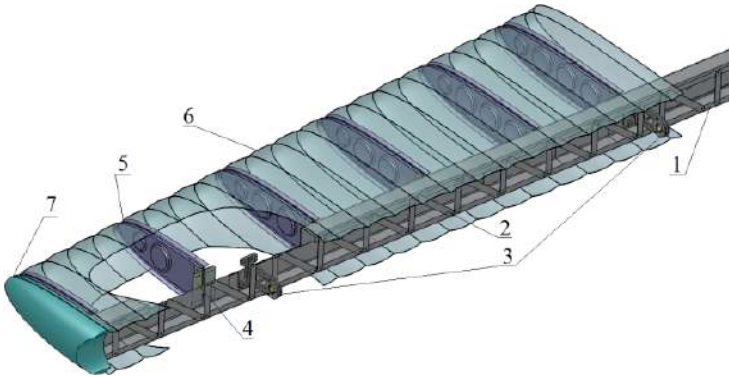


Рис. 2 – Конструкция стабилизатора:

1 - лонжерон, сборной конструкции; 2 - набор распорок; 3 - узлы навески рулевых поверхностей; 4 - уголок; 5 - пластиковая нервюра; 6 - волнистая обшивка; 7 - концевой обтекатель

Нервюра руля – первый тип деталей, изготовленный из ПЭТ для планера, на ней был отработан техпроцесс термоформовки и получен опыт по работе с данным материалом. Во время работы было выявлено, что листовая заготовка ПЭТ в состоянии поставки имеет различную усадку в разных направлениях, а также, в результате нагрева заготовка всегда скручивается в определенном направлении. Эти параметры важно учитывать при укладке заготовки на пуансон, для исключения брака.

В конструкции хвостового оперения планера планируется использовать волнистые аэродинамические поверхности. Согласно исследованиям [1], при увеличении угла атаки на гладком крыле образуется отрывной пузырь, неустойчивое положение которого может привести к полному отрыву потока. Применение же волнистых поверхностей способствует образованию локальных отрывных пузырей во впадинах поверхности, такие пузыри отличаются большей устойчивостью. Таким образом, отодвигается момент отрыва потока с поверхности крыла. Кроме этого, волнистая поверхность повышает крутильную жесткость самой обшивки.

Поэтому, одним из важных параметров материала обшивки – способность принимать сложные геометрические формы. Использование ПЭТ и метода термовакуумной формовки позволяет добиться требуемой геометрии. Сущность данного метода заключается в том, что разогретый и размягченный пластик за счет разрежения в области между матрицей и заготовкой облегает образующую поверхность, и после охлаждения принимает ее форму. [2, 3]

Для формовки, на ЧПУ станке была изготовлена оснастка, представляющая собой матрицу с волнистой поверхностью, также были изготовлены рубильники для закрепления заготовки на матрице. Разрезание в пространстве между заготовкой и матрицей создается при помощи строительного пылесоса, способного обеспечить большой расход при допустимом разрезании.

Основываясь на технологии изготовления нервюр руля, были сделаны нервюры стабилизатора. Для этого был изготовлен штамп со сменными элементами для формовки нервюр разной длины. Техпроцесс изготовления идентичен разработанному для нервюр руля, ввиду примерно одинаковых габаритов деталей.

Одной из важнейших задач была подборка клея для соединения деталей из ПЭТ, потому что ПЭТ не клеится распространенными видами клея. Для соединения деталей был выбран полиуретановый клей COSMO PU-200.280. [4]

Изготовив все необходимые детали, был собран пробный образец рулевой поверхности (рис. 3), на основе которого был опробован процесс сборки и получено представление о перечне необходимой оснастки для сборки полноценных рулей и стабилизатора. Также, некоторые части рулевой поверхности были доработаны для повышения прочности руля и увеличения технологичности сборки.



Рис. 3 – Пробный образец рулевой поверхности

В настоящее время производится подготовка к процессу формовки матрицы для обшивки стабилизатора. Данная матрица, в отличие от предыдущей, имеет внутреннюю полость, благодаря которой снижается

масса оснастки, а также появляется возможность создания на поверхности матрицы перфорации, способной обеспечить откачку воздуха со всей поверхности матрицы.

В дальнейшем планируется получение волнистой обшивки для крыла планера по аналогичной технологии. Использование ПЭТ обшивки в совокупности с пластиковыми нервюрами применимо при конструировании некоторых элементов конструкции легких ЛА, лопастей ветряных электрогенераторов, а также при создании беспилотных летательных аппаратов.

Литература:

1. I.D. Zverkov, A.V. Kryukov Impact onto the boundary layer on the airfoil of a small-sized flying vehicles with the use of a wavy surface. Problems and prospects (review). // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2021, Vol. 62, No. 3

2. Руководство для конструкторов летательных аппаратов самодеятельной постройки РДК СЛА: В. 2 т. / Сиб. НИИ авиации им. С. А. Чаплыгина. - Новосибирск: СибНИА, 1989. - 22 см. Т. 2: Прочность. - Новосибирск: СибНИА. - 222 с.

3. П. Шварцман, А. Иллиг Термоформование. Практическое руководство / пер. с англ. под ред. М.А. Шерышева – Спб.: Профессия, 2007. – 288 с., ил.

4. Cosmo PU-200.280 / Cosmofen DUO бежевый двухкомпонентный клей для металла / <https://cosmofen.pro/products/cosmo-pu-200-280> (дата обращения 10.11.2021)

## **ПРОБЛЕМЫ МАЛОЙ АВИАЦИИ В РОССИИ**

**А.Ю. Хохлова**

**Московский авиационный институт (НИУ); г. Москва**

**e-mail: [annah2002@mail.ru](mailto:annah2002@mail.ru)**

*Современные условия жизни диктуют свои требования к малой авиации. Несмотря на развитие современных технологий в нашей стране недостаточно внимания уделяется развитию данной отрасли. В других странах данный вид летательных аппаратов уже давно интегрирован в повседневную жизнь людей. Однако в настоящее время малая авиация зачастую сталкивается с некоторыми трудностями, которые требуют оперативного решения. В данной проделанной*

*работе была изучена и проанализирована малая авиация России, сопоставлено с отношением других стран к данным типам воздушных судов и предложены одни из путей решения проблем, с которыми зачастую сталкиваются малогабаритные самолёты в России.*

*Modern living conditions dictate their own requirements for small aircraft. Despite the development of modern technologies in our country, not enough attention is paid to the development of this industry. In other countries, this type of aircraft has long been integrated into the daily life of people. However, at present, small aircraft are often faced with some difficulties that require a prompt solution. In this work done, the small aircraft of Russia were studied and analyzed, compared with the attitude of other countries to these types of aircraft, and one of the ways to solve the problems that small aircraft in Russia often face was proposed.*

Под малой авиацией обычно подразумевают небольшие по размеру воздушные суда, такие как самолёты (максимальная взлётная масса не более 5700 кг и число пассажиров до 9 человек для нормальной категории и масса не более 8600 кг и пассажиров до 19 для переходной категории) и вертолёты (максимальная взлётная масса до 4500 кг)

Несмотря на свой небольшой размер данные летательные аппараты весьма безопасные, надёжные и простые в эксплуатации, так как состоят из малого количества деталей. Кроме того, такие воздушные суда просты в обслуживании, легко пилотируются, поэтому и обладают обширным диапазоном применения. И что не менее важно получить лицензию на управление такими самолётами легче, чем на габаритные летательные аппараты.

Благодаря правильной эксплуатации, судна способны служить в течение длительного периода времени.

Существует множество способов, где модно использовать лёгкие и компактные самолёты:

- *Мониторинг нефтепроводов и ЛЭП.*
- *Мониторинг городских кварталов в инфракрасном свете на предмет утечек тепла.*
- *Мониторинг лесоохранны на предмет возгораний и пожарной безопасности.*
- *Санитарная авиация.*
- *Полицейская авиация.*
- *Авиация МЧС.*
- *Аэрофотосъемка.*
- *Сельскохозяйственные работы.*

- *Учебные полеты в частных аэроклубах и центрах подготовки пилотов.*
  - *Экскурсионные полеты.*
  - *Воздушная реклама.*
  - *Частные полеты.*
  - *Корпоративные полеты, в деловых или развлекательных целях*
- и т.д.*

### ***Малая авиация в России***

Развитию малой авиации в настоящее время уделяется много внимания, однако, несмотря на это, Россия намного отстаёт в развитии от других стран.

В настоящее время в РФ малая авиация плохо развита. В этом можно легко убедиться, ссылаясь на исследования 2018 года, исходя из которых в России насчитывалось 228 аэродромов для малой авиации, а в США - 13513. Причиной этому могут служить:

- Незаинтересованность правительства и самих людей в развитии авиации
- Недостаточно средств на строительство аэродромов
- Недостаточно средств на покупку и содержание летательных аппаратов
- Недостаточно людей, способных управлять данными воздушными судами
- Недостаточные знания людей в области авиации
- Мало мест, где люди бы смогли получить все необходимые знания об авиации
- Сложные требования к тем, кто хочет получить лицензию пилота

*И т.д.*

Исходя из вышесказанного, можно заметить, что для решения проблемы, связанной с отставанием РФ в развитии малой авиации от других стран, необходимо решить проблемы, описанные выше.

На данный момент стать пилотом-любителем может каждый желающий в возрасте от 18 лет, имеющий хорошее здоровье, после прохождения специального обучения, его можно получить в аэроклубах, лётных училищах и лётных школах, где будет дана необходимая теория и практика с инструктором. Для получения лицензии коммерческого пилота требуются весьма жёсткие требования.

Несмотря на наличие возможности получить лицензию летчика в РФ, похвастаться её обладанием могут не многие, это связано с тем, что в России очень мало таких мест и цены на обучение высокие, поэтому многие люди, которые хотят получить FAA лицензии обычно летят во



Флориду или центральные части Штатов, а EASA лицензию получают в Испании, Чехии или странах Прибалтики.

Для развития малой авиации в РФ необходимо:

- С детства рассказывать человеку об авиации, создавать различные авамодельные кружки, причём не только в городах миллионниках, но и в малых районах
  - Создать больше авиатренажёров, чтобы любой желающий мог испытать себя в качестве пилота
  - Увеличить количество аэродромов для малой авиации
  - Увеличить парк самолётов
  - Сделать больше центров, где люди смогли бы получить лицензию лётчика
  - Сделать лицензии дешевле, уменьшить процесс лицензирования
  - Снизить налог на воздушное судно
  - Пропагандировать престижность получения лицензии лётчика среди молодёжи

#### **Вывод**

Выполнив данные предположения, поспособствует развитию не только малой авиации в РФ, но и экономике, так как понадобится больше людей, кто будет создавать и обслуживать самолёты и аэродромы. После получения лицензии лётчика-любителя, таким людям проще стать коммерческими пилотами. Всё это может привести к тому, что Россия не только догонит другие страны по развитию малой авиации, но и обгонит.

#### **Литература**

1. "Авиационные правила. Часть 23. Нормы летной годности гражданских легких самолетов" (утв. МАК).
2. "Авиационные правила. Часть 27. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории" (одобрены Постановлением 34-ой сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства от 06.12.2013).
3. <https://www.flightradar24.com/41.84,55.78/3>
4. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ

# ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЛАМИНАРНЫХ ПРОФИЛЕЙ И ИНТЕГРАЦИИ ПРОФИЛЕЙ С ПЛАНЕРОМ ЛЕГКОГО САМОЛЕТА

**Е.А. Карпович**

**Московский Авиационный Институт, г. Москва,  
karpovichea@mai.ru**

*В докладе рассмотрен ряд статей, посвященных вопросам аэродинамического проектирования и оптимизации ламинарных профилей для самолетов общего назначения. Особое внимание уделено применяемым исследователями методам решения прямой и обратной задач проектирования профилей для заданного числа Рейнольдса, а также вопросам взаимосвязи геометрических параметров и аэродинамических характеристик профилей.*

*The report considers a number of papers devoted to aerodynamic design and optimization of laminar airfoils for General Aviation applications. Special attention is paid to the methods used by researchers to solve direct and inverse airfoil design problems for the specified Reynolds number, as well as to the relationship between geometric parameters and aerodynamic characteristics of airfoils.*

Цель исследования состояла в следующем:

- определить, как в инженерной практике принято формулировать обратную задачу аэродинамического проектирования аэродинамических профилей и как следует интерпретировать результаты, получаемые в ходе автоматизированного решения этой задачи;
- изучить возможность применения ламинарных профилей в проектах самолетов общего назначения.

Вязкий поток - это модель среды, в которой учитываются эффекты вязкости, теплопроводности и массовой диффузии.

Эффекты вязкости (уменьшение скорости и увеличение давления) заключаются в возникновении двух видов сопротивления [1]:

- сопротивления трения (проекция интеграла касательного напряжения на направление лобового сопротивления);
- сопротивления давления, возникающего из-за отрыва потока (проекция интеграла нормального напряжения на направление лобового сопротивления).

Для удобообтекаемых тел с относительно высоким сопротивлением трения эффективней снижать сопротивление трения за счет ламинаризации течения на границе с телом, чем снижать сопротивление давления за счет его турбуликации.

Композиционные материалы позволяют обеспечивать степень гладкости поверхности, необходимую для эффективной эксплуатации самолетов с ламинарными крыльями [2].

Литература по ламинарным профилям очень обширна. В большинстве изученных публикаций (например, [2, 4, 5, 7-8]) для формирования геометрии профиля использовался метод обратного проектирования Эпплера [3].

При использовании в качестве целевой функции составного параметра  $C_{y \max}/C_{x \text{ крейс}}$  (для легкого одномоторного самолета общего назначения) можно уменьшить сопротивление крыла при нулевой подъемной силе. К сожалению, высокий максимальный коэффициент подъемной силы и низкий коэффициент лобового сопротивления, как правило, являются противоречащими друг другу требованиями, поскольку по мере увеличения ламинарного потока на верхней поверхности градиент давления в кормовой части верхней поверхности увеличивается, тем самым уменьшая максимальный коэффициент подъемной силы. В [2] было показано, что  $C_{y \max}/C_{x \text{ крейс}}$  будет максимальным для профиля NLF(1)-0416, если протяженность ламинарного погранслоя будет составлять около 40 процентов хорды на верхней поверхности и около 60 процентов хорды на нижней поверхности профиля.

Для высотного, барражирующего ЛА в качестве целевой функции может выступать параметр  $C_{y \max} / C_{x \text{ крейс}}$  продолж

Один из способов уменьшения аэродинамического сопротивления профиля состоит в том, чтобы укоротить ламинарный пузырь, смещая точку ламинарно-турбулентного перехода ближе к носу хорды. С другой стороны, устранение пузыря нежелательно, так как это увеличит турбулентное сопротивление трения [4]. Оптимальная точка перехода обычно находится вблизи точки ламинарного отрыва, поскольку в этом случае оторвавшийся погранслой не успевает отойти слишком далеко от поверхности крыла. Следовательно, задачу при проектировании аэродинамического профиля с низким лобовым сопротивлением можно сформулировать следующим образом: удерживать точку ламинарно-турбулентного перехода непосредственно за точкой ламинарного отрыва на максимально возможном диапазоне углов атаки. Для решения этой задачи необходимо отрегулировать длину и наклон участка восстановления давления на кормовой части профиля, а также положение точки ламинарно-турбулентного перехода *за счет изменения максимального значения кривизны, положения точки максимальной кривизны на хорде и формы носика.*

При уменьшении числа Рейнольдаса длина и наклон переходного участка на графике распределения давления должны увеличиваться. Такой подход позволяет компенсировать снижение способности пограничного слоя осуществлять ламинарно-турбулентный переход при уменьшении числа Рейнольдса [4]. С другой стороны, при несоблюдении чистоты поверхности и геометрии крыла увеличение градиента восстановления давления в задней части профиля увеличивает риск преждевременного ламинарного отрыва и снижения несущей способности крыла.

Максимально широкий диапазон «ламинарного кармана» достигается, когда ламинарный пограничный слой удерживается на грани ламинарного отрыва, а затем на грани ламинарно-турбулентного перехода [8].

При оптимизации формы профиля необходимо учитывать, что целевой функцией являются некие характеристики самолета с интегрированным в его конструкцию профилем. В [7] были предложены варианты целевых функций, обеспечивающих оптимизацию профилей с учетом взаимного влияния профиля и планера ЛА на заданном режиме полета.

#### Литература:

1. John D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. – Mariland: McGRAW-HILL, 2017.
2. Selig, Michael S.; Maughmer, Mark D.; Somers, Dan M. (1995). Natural-laminar-flow airfoil for general-aviation applications. *Journal of Aircraft*, 32(4), 710–715. doi:10.2514/3.46781
3. Eppler R., Somers D. M. A Computer Program for the Design and Analysis of Low-Speed Airfoils [Electronic resource] // Langley Research Center Hampton, 1980 - URL: [https://archive.org/details/NASA\\_NTRS\\_Archive\\_19800020753](https://archive.org/details/NASA_NTRS_Archive_19800020753) (accessed 17.10.2021).
4. Drela M. Low-Reynolds-number airfoil design for the M.I.T. Daedalus prototype: A Case Study // *Journal of Aircraft*. 1988. Vol. 25. No. 8, pp. 724-732. DOI: 10.2514/3.45650
5. McGhee R. J., Beasley W. D., Whitcomb R.T. NASA Low- and Medium-Speed Airfoil Development [Electronic resource] // Langley Research Center Hampton, 1979 - URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19800012809> (accessed 17.10.2021).
6. Sapuppo J. Archer R.D. (1982). Fully laminar flow airfoil sections. *Journal of Aircraft*, 19(5), 406–409. DOI:10.2514/3.44763.

7. Maughmer M., Somers D. [American Institute of Aeronautics and Astronautics Aircraft Design, Systems and Operations Conference - Atlanta, GA, U.S.A. (07 September 1988 - 09 September 1988)] Aircraft Design, Systems and Operations Conference - Figures of merit for airfoil/aircraft design integration. DOI:10.2514/6.1988-4416

8. Somers D.M. Subsonic natural-laminar-flow airfoils [Electronic resource] // Langley Research Center Hampton, VA - URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4612-2872-1\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4612-2872-1_4) (accessed 17.10.2021).

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВНИЕ ПО КРИТЕРИЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛИВА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ВОЗДУХОЗАБОРНОМ УСТРОЙСТВЕ**

**П.Д. Шилин**

**Тульский государственный университет,**

**г. Тула, [rs@tsu.tula.net](mailto:rs@tsu.tula.net)**

**Научный руководитель: Ветров В.В., д.т.н., профессор**

*Рассматривается методика обоснования целесообразности применения слива пограничного слоя (ПС), либо его отсутствия в воздухозаборных устройствах (ВЗУ), основанная на применении методов численного моделирования газодинамических процессов в ВЗУ различной проектной конфигурации и анализа сравнения энергозатрат на активном участке полета.*

*The method of substantiating the expediency of using boundary layer discharge or its absence in air intake devices is considered, based on the application of methods of numerical simulation of gas dynamic processes in air intake devices of various design configurations and analysis of comparison of energy consumption in the active flight section.*

В настоящее время очевиден всплеск интереса к исследованию процессов функционирования летательных аппаратов (ЛА) с прямоточными силовыми установками (ПСУ). Это объясняется, с одной стороны, необходимостью повышать баллистическую эффективность ЛА, а с другой – расширением возможностей анализа работы таких систем на основе качественного нового инструментария численного моделирования сложных газодинамических процессов.

Одним из направлений таких исследований является обоснование предпочтительных конфигураций воздушного тракта ПСУ. Это подтверждается многочисленными публикациями отечественных и зарубежных ученых. Однако, чаще всего исследования ведутся без

четкой привязки к конструктивным и функциональным особенностям ЛА, не учитывая, что ВЗУ является одним из ключевых элементов ПСУ и во многом определяет ее эффективность в создании сил. Эффективность самого ВЗУ принято оценивать по величинам рабочих (дроссельных) характеристик, таких как коэффициент восстановления полного давления и коэффициент расхода воздуха. И по отношению к создаваемому уровню усилия силовой установки (СУ) они имеют прямо пропорциональную зависимость. С улучшением внутренних силовых характеристик возникают негативные явления, связанные с увеличением аэродинамического сопротивления в процессе функционирования. Это происходит от того, что при разработке стараются приблизить воздушный поток на входе в ВЗУ к идеальному состоянию и в первую очередь это достигается за счет каналов слива ПС.

До настоящего времени нет четких критериев, позволяющих исходя из баллистической эффективности ЛА, а также с учетом того, что устройство слива создает дополнительное аэродинамическое сопротивление, судить о целесообразности его наличия или отсутствия.

В связи с этим вопрос выбора, иметь слив ПС или от него отказаться, в пользу повышения баллистической эффективности ЛА, становится принципиальным. В таком случае в качестве глобального критерия, определяющего баллистическую эффективность, было принято значение работы силы аэродинамического сопротивления и работы создаваемой силовой установкой.

Выявить роль положительных и отрицательных факторов можно только на основе полного моделирования целевого функционирования. Такой комплексный подход к структурно-параметрическому синтезу ВЗУ в единой системе с ЛА является новым, так как позволяет качественно и количественно оценить параметры ЛА в целом, обусловленные влиянием ВЗУ.

Для получения целостной информации проведено комплексное исследование с применением критериев баллистической эффективности для оценки целесообразности слива ПС. Для чего осуществлена предварительная проработка опорных вариантов конструкций ВЗУ. Одним из первых базовых вариантов стал радиально профилированный диффузор с внешним сжатием (рис. 1 а), построенный на основе экспериментальных данных ФГУП «ЦАГИ» [1]. На его основе синтезирован вариант ВЗУ со сливом пограничного слоя (рис. 1 б).

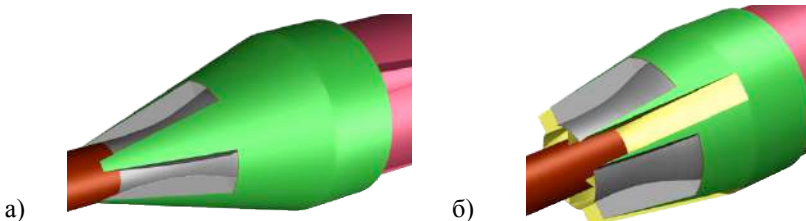


Рис. 1 – Схемы ВЗУ: а) без слива ПС; б) со сливом ПС

На основном этапе исследования необходимо сравнение полученных конструкций ВЗУ с точки зрения не только их дроссельных характеристик, а способности в целом к увеличению баллистической эффективности ЛА. Для решения поставленной задачи появилась необходимость разработки инструментария исследования (выбора и настройки программных продуктов, а также проверки адекватности получаемых результатов).

Для численного моделирования течений в ВЗУ использовался программный продукт ANSYS Fluent. Верификация проведена по известным экспериментальным данным, полученным при аэродинамических продувках. Получено хорошее согласование численного эксперимента с экспериментальными данными [2].

Таким образом, разработанная методика была реализована при обосновании структурно-параметрического синтеза ВЗУ. И на ее основе получены значения дроссельных характеристик конфигураций ВЗУ со сливом и без слива ПС, а также коэффициенты дополнительного аэродинамического сопротивления, привносимого конструкцией ВЗУ и каналов слива для широкого диапазона чисел Маха. Эти характеристики использовались в качестве исходных данных при прогнозной оценке достижения дальности как аналог критерия достижения баллистической эффективности.

Качество ВЗУ определяет величину максимально возможного усилия СУ, а, следовательно, только из соотношения полного импульса этой силы и суммарного импульса силы аэродинамического сопротивления возможно сделать вывод о целесообразности той или иной конструкции.

В качестве количественного критерия оценки двух противоборствующих факторов (силы СУ и аэродинамического сопротивления) взята работа на траектории рассматриваемых сил, т.е.:

$$A_T = \int PdY, A_{aep} = \int F_x dY,$$

где  $A_T$  – работа СУ;  $P$  – сила СУ;  $Y$  – высота,  $A_{aэp}$  – работа силы лобового сопротивления;  $F_x$  – сила лобового сопротивления.

Исходя из выше изложенного, полученные результаты, дополняют имеющийся теоретический базис проектирования ЛА с ПСУ. По результатам численного эксперимента можно сделать следующие частные выводы:

1) вариант без слива ПС имеют худшие дроссельные характеристики, но обладают меньшим аэродинамическим сопротивлением и конструктивно более прост в реализации;

2) при качественной организации слива ПС возможно увеличение коэффициента восстановления полного давления до 45 % и коэффициента расхода до 40 %;

3) значительное улучшение рабочих характеристик ВЗУ со сливом ПС приводит к росту коэффициента аэродинамического сопротивления до 60 %.

4) для ЛА, которым свойственно отделение СУ после завершения ее работы, в диапазоне чисел Маха от 3 до 3.8 конфигурации со сливом ПС являются наиболее предпочтительными и позволяют повысить энергетику ПСУ до 39 % при росте работы сил сопротивления до 21%;

7) использование конфигураций ВЗУ со сливом ПС в ЛА со значительно более продолжительным по времени энергопассивным участком (в несколько раз больше времени работы ПСУ) приводит к более значительному импульсу сил аэродинамического сопротивления, нивелирующему положительный эффект, получаемый от улучшения дроссельных характеристик ВЗУ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90136\20.

#### Литература

1. Кольцевые и секторные воздухозаборники с сужением фюзеляжа перед входом и эффективность их использования на ракетах с ПВРД/ В.В. Затолока, Е.В. Александрович, А.А. Семенов, А.К. Трифонов // Труды ЦАГИ – 1968.

2. Морозов В.В., Шилин П.Д. Верификация программного комплекса ANSYS Fluent для численного моделирования газодинамических процессов в воздухозаборных устройствах// Авиакосмические технологии (АКТ-2021): Тезисы XXII Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов.– Воронеж; 2021 – 120 с.



## **ВНЕДРЕНИЕ ГИДРОШТАМПОВКИ В ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ХВОСТОВОЙ БАЛКИ СТУДЕНЧЕСКОГО МОТОПЛАНЕРА «САРМА-2»**

**Д.А.Матвеев**

**Мохвов Ю.В. Учебный мастер Кафедры СиВС ФЛА НГТУ  
Новосибирский государственный технический университет  
СКБ ФЛА НГТУ, г. Новосибирск, [danya.matveev.00@yandex.ru](mailto:danya.matveev.00@yandex.ru)**

*В настоящее время в СКБ ФЛА НГТУ идет разработка и изготовление студенческого мотоплана «Сарма-2», в основе которого лежит использование клееклепанных соединений деталей, изготовленных с помощью формовки из листов D16T и ПЭТГ. В данной публикации представлен технологический процесс изготовления и сборки элементов хвостовой балки, а так же сопутствующего оборудования и оснастки.*

*At present, SDO FFA NSTU is developing and manufacturing a student motor-glider "Sarma-2", which is based on the use of glued joints of parts made by molding from D16T and PETG sheets. This publication presents the technological process of manufacturing and assembly of tail boom elements, as well as related equipment and accessories.*

Технология гидроштамповки была выбрана потому что, она дешевле чем штамповка на прессах, является более безопасной, что позволяет работать на ней студентам в учебных корпусах. В отличие от работы с композиционными материалами не является вредной для здоровья.

Задача изготовления хвостовой балки делится на 2 этапа:

1) изготовление обшивки балки; 2) изготовление шпангоутов путём формовки заготовок с помощью эластичной среды, создание сопутствующего оборудования и отработка технологии.

В рамках 1 го этапа решены следующие задачи:

1) Разработан технологический процесс изготовления обшивки хвостовой балки мотоплана.

Согласно 3Д модели были приготовлены файлы для лазерной выкройки. Определены необходимые параметры гибки: углы пружинения, радиусыгиба, усилие гибки.

В рамках 2 го этапа решены следующие задачи:

1) Спроектирована и изготовлена печь для закалки алюминиевых заготовок. Рабочая температура печи до 500 °С, габариты рабочей зоны 1500x400x400 мм.

2) Разработана, изготовлена, модернизирована установка по штамповке заготовок. Установка имеет рабочую часть 500x800мм.

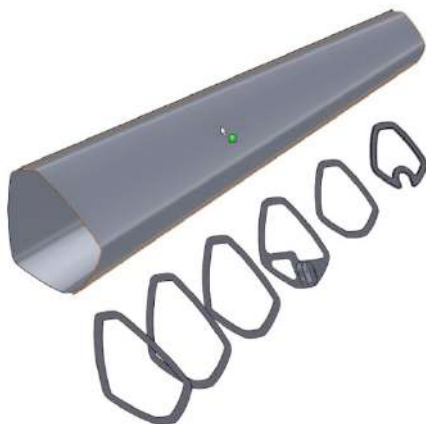


Рис 1 – Обшивка хвостовой балки и её силовой набор



Рис 2 – Гидроштамповочная установка

- 3) Изготовлена оснастка для формовки заготовок:  
Обтяжные пуансоны изготовлены из листа МДФ толщиной 22 мм, служат для поддержки заготовки при формовке и получения отбортовок заданной длины.



Рис 3 – Пуансон и готовый шпангоут

4) Отработана технология формовки заготовок:

Рабочее пространство установки имеет геометрию, требующую оптимального размещения заготовок на рабочем пространстве. Для защиты мембран от повреждения материалом, на них наклеивается дополнительный эластичный элемент, предусмотрены специальные рукава, служащие воздухоотводом при формовке, во избежание непроштампованных участков на изделии. В установке прошёл успешную штамповку тестовый шпангоут № 2.

Выводы:

На данный момент по проекту выполнены следующие задачи :

- 1) Отштампован шпангоут №2 , изготовлена оснастка для его изготовления .
- 2) Разработана технология изготовления , спроектирована оснастка .

Литература :

1. П.И.Чумак , В.Ф.Кривокрысенко . Расчет , проектирование сверхлегких самолетов. -М.: Патриот, 1991. -238с., ил.
2. Руководство для конструкторов летательных аппаратов модельной постройки , РДК СЛА. УДК 629. 7. 02: 539. 4
3. Л.В.Петунькина,Н.В.Курлаев,К.Н.Бобин. Технология изготовления деталей летательных аппаратов: учеб-метод пособие:-Новосибирск: Изд-во НГТУ,2015-90с.

## Секция ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН

### **АВТОМАТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ПУЗЫРЬКОВЫХ СИСТЕМ**

**А.Е. Артемьев**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск**

**Научный руководитель: Красноруцкий Д.А., к.т.н., доцент**

*Метод, называемый пузырьковым разбиением, основан на наблюдении, что узор плотно упакованных сфер имитирует диаграмму Вороного, из которой можно создать набор хорошо сформированных треугольников Делоне, соединяя центры пузырьков. Учитывая геометрию предметной области и функцию расстояния между узлами, сферы упаковываются на геометрические объекты. Как только домен заполняется сферами, узлы сетки помещаются в центры этих сфер и затем соединяются ограниченной триангуляцией Делоне. Чтобы получить плотно упакованную конфигурацию сфер, разработана методика физически обоснованной сетчатой релаксации с адаптивным контролем численности популяции*

*The method, called bubble meshing, is based on the observation that a pattern of densely packed spheres mimics a Voronoi diagram, from which a set of well-formed Delaunay triangles can be created by connecting the centers of the bubbles. Given the geometry of the subject area and the function of the distance between nodes, the spheres are packed into geometric objects. As soon as the domain is filled with spheres, the grid nodes are placed in the centers of these spheres and then connected by a limited Delaunay triangulation. In order to obtain a densely packed configuration of spheres, a technique of physically based mesh relaxation with adaptive population control has been developed.*

Физическая модель для создания сетки, представленная в этом тезисе как «система пузырьков», изначально была основана на наблюдении за реальными мыльными пузырями, плавающими в жидкости. Эти пузыри плотно упакованы и образуют практически правильный шестиугольный узор. Соединяя центральные точки пузырьков, получается сетка, состоящая из равносторонних треугольников.

Начальное размещение пузырьков.

Важно получить хорошую начальную конфигурацию пузырьков перед физической релаксацией по двум причинам. Во-первых, когда скорость наиболее критична, сама начальная конфигурация пузырька может служить быстрым решением триангуляции, во-вторых, хорошая

начальная догадка значительно сократит время сходимости длительного процесса релаксации позже.

Чтобы справиться с различным расстоянием между узлами, разработан метод размещения пузырьков, основанный на иерархическом пространственном разбиении. Этот метод разбивает кривую, поверхность или объем иерархически. В процедурах разбиения этого процесса домен разбивается и пузырьки вставляются до тех пор, пока они не покроют всю область без значительных зазоров или перекрытий.

Например, чтобы разместить начальные пузырьки на отрезке кривой  $C(s)$ ,  $s_1 \leq s \leq s_2$ , пузырьки сначала помещаются на две конечные точки области  $C(s_1)$  и  $C(s_2)$ . Диаметры этих пузырьков в пространстве объектов вычисляются как  $d_1 = d[C(s_1)]$  и  $d_2 = d[C(s_2)]$  с помощью функции расстояния между узлами  $d(x, y, z)$ . Затем вычисляется длина кривой между конечными точками,

и эта длина сравнивается с суммой двух радиусов,  $\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2}$ . Если длина

кривой больше суммы радиусов, в среднюю точку  $C\left(\frac{s_1 + s_2}{2}\right)$

вставляется новый пузырь, и сегмент кривой делится на два подсегмента:  $s_1 \leq \frac{s_1 + s_2}{2}$  и  $\frac{s_1 + s_2}{2} \leq s_2$ . Такая же проверка расстояния

затем выполняется на каждом подсегменте рекурсивно.

Между пузырьковые силы.

Между пузырьковая сила, основанная на расстоянии между пузырьками, определяется так, что система пузырьков находится в равновесии, когда пузырьки плотно упакованы. Стабильное расстояние  $l_0$  между двумя пузырьками определяется как сумма радиусов

$l_0 = \frac{d(x_i, y_i, z_i)}{2} + \frac{d(x_j, y_j, z_j)}{2}$ . Теперь мы определим между пузырьковую

силу  $f$ , очень похожую на силу Ван-дер-Ваальса, такую, что сила отталкивания применяется, когда два пузырька расположены ближе, чем стабильное расстояние  $l_0$  (пузырьки перекрываются), и сила притяжения применяется, когда пузырьки лежат дальше друг от друга, чем  $l_0$  (есть зазор). Как показано на рис. 1, реализованная сила  $-f$

определяется как ограниченная кубическая функция расстояния  $l$ , удовлетворяющая следующим граничным условиям:

$$f(l) = \begin{cases} al^3 + bl^2 + cl^2 + d & 0 \leq l \leq 1.5l_0 \\ 0 & 1.5l_0 < l \end{cases}$$

$$f(l_0) = f(1.5l_0) = 0, \quad f'(0) = 0, \quad f'(l_0) = -k_0$$

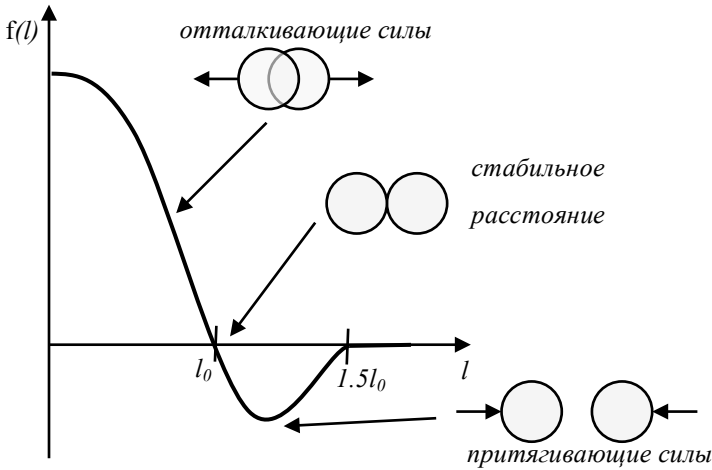


Рис.1 – Межпузырьковая сила

Заметим, что  $k_0$  представляет собой соответствующую линейную постоянную пружины на стабильном расстоянии  $l_0$ . Это один из ключевых физических параметров, определяющих поведение пузырьковой системы.

Динамика пузырьков.

Управляющее уравнение движения  $i$ -го пузырька записывается следующим образом:

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} + c_i \frac{dx_i(t)}{dt} = f_i(t), \quad i = 1 \dots n,$$

где  $m_i$  – масса,  $c_i$  – коэффициент демпфирования,  $x_i$  – положение  $i$ -той степени свободы в пространстве объекта. Учитывая начальные положения пузырьков, мы интегрируем дифференциальные уравнения во времени на каждом временном шаге, используя стандартный метод

Рунге-Кутта четвертого порядка. Процесс интегрирования повторяется фиксированное число раз, заданное пользователем, или до тех пор, пока система не достигнет равновесия, состояния, в котором расстояние, перемещаемое пузырьками за один временной шаг в любой степени свободы, становится меньше заданного малого значения.

Адаптивный контроль популяции.

Чтобы упаковать необходимое и достаточное количество пузырьков внутри домена, мы разработан автоматический метод адаптивного управления популяцией пузырьков. Этот метод исследует локальную популяцию пузырьков, удаляет избыточные пузырьки, которые значительно перекрывают своих соседей, и добавляет пузырьки вокруг открытых пузырьков, которым не хватает соответствующего количества соседних пузырьков (рис. 2.).

Для того чтобы определить, является ли пузырь избыточным или открытым, используется следующий коэффициент перекрытия,  $\alpha_i$ , для  $i$ -го пузыря определяется:

$$\alpha_i = \frac{2}{d(x_i)} \sum_{j=0}^n \left( d(x_i) + \frac{d(x_j)}{2} - x_i x_j \right)$$

где  $x_i$  – расположение  $i$ -го пузырька в пространстве объектов,  $x_j$  – расположение  $j$ -го соседнего пузырька, а  $n$ -количество соседних пузырьков. Это уравнение добавляет расстояния, на которые двойной размер  $i$ -го пузырька проникает или отделяется от соседних пузырьков. А затем делит результат на исходный радиус пузырька.

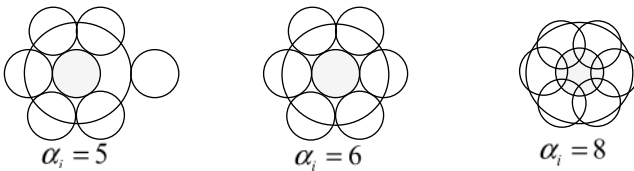


Рис.2 – Коэффициент перекрытия

Важно также отметить, что проверка заселенности пузырьков выполняется автоматически только тогда, когда система пузырьков относительно стабильна, то есть, когда максимальная скорость всех пузырьков находится в пределах небольшого значения.

Таким образом, основную идею метода построения сетки, можно разделить на два этапа: упаковать пузырьки близко в область и

соединить центральные точки с помощью триангуляции Делоне. Настоящая проблема — это первый шаг, а именно получение оптимальной упаковки сфер, которая удовлетворяет заданному расстоянию между узлами.

Литература:

1. Shimada, K., Physically-Based Mesh Generation: Automated Triangulation of Surfaces and Volumes via Bubble Packing, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1993.

2. Kenji Shimada, David C. Gossard. Bubble mesh: Automated triangular meshing of non-manifold geometry by sphere packing. In: Proceedings of Solid Modeling'95, Salt Lake City, 1995. 409~419

3. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Анализ показателей электромагнитных ударных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72–80.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ И ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТ АНИЗОГРИДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

**Л.М. Ковальчук**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, lol.petrushka@mail.ru**

**Научный руководитель: Бурнышева Т.В., д.т.н., доцент**

*Построены и рассчитаны дискретные модели оболочек с постоянной массой в Ansys Mechanical APDL с разной густотой регулярной сетки. По результатам варьирования параметров реберной структуры оболочек проведено исследование их собственных частот и форм колебаний.*

*Discrete models of shells with constant mass in Ansys Mechanical APDL with different density of a regular grid are constructed and calculated. Based on the results of varying the parameters of the rib structure of the shells, the study of their own frequencies and forms of vibrations was carried out.*

Композитные сетчатые цилиндрические оболочки [1] широко распространены в космической отрасли. Это обусловлено сочетанием высоких прочностных характеристик сеток при небольшой массе. При выходе космического аппарата на орбиту, конструкция испытывает действия сильных вибраций. Поэтому главной задачей при



проектировании сетчатых оболочек, выступающих силовыми элементами космических летательных аппаратов [2], является подбор оптимальных характеристик структур сеток.

Рассматривается сетчатая оболочка из композиционного материала (углепластик) регулярной структуры на собственные формы колебаний и значения частот. Структура оболочки включает верхний и нижний шпангоуты, кольцевые и спиральные ребра с углом наклона равным  $26^\circ$ . Масса конструкции остается неизменной во всех вариантах расчета.

Алгоритм расчета параметров реберной структуры оболочки, а именно толщин и высот, реализован в математической среде Mathcad14. Для конструкций были вычислены постоянные масса  $M=176.352$  кг и объем  $V=0.088$  м<sup>3</sup> (Рисунок 1).

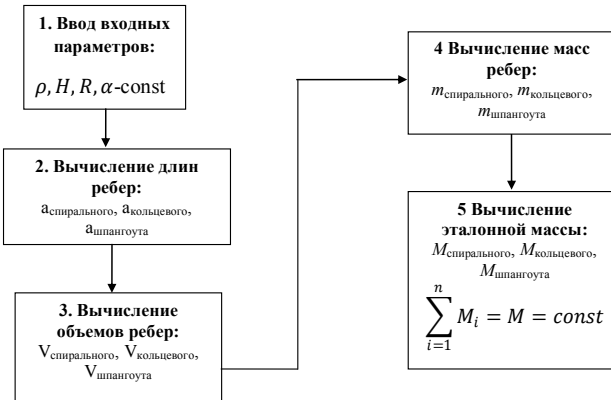


Рис.1 – Блок-схема алгоритма вычисления массы конструкции

Построение дискретной модели и расчет производится в программном комплексе *Ansys Mechanical APDL* [3] путем формирования макроса. Задавалась параметрическая модель с входными параметрами: высота -  $H(R)$ , количество рядов -  $m$ , число пар спиральных ребер -  $N$ . При построении дискретной модели использовался конечный элемент BEAM4 [4]. Расчет проводился для конструкций с разной плотностью реберной сетки (80, 120, 160, 240 и 320 числом спиральных ребер).

В ходе вычислительного эксперимента [5] варьировались параметры: от 80-320 пары спиральных ребер ( $N$ ); от 5 до 1.3 мм толщины ( $\delta$ ) для спиральных; от 15 до 3.2 мм толщины ( $\delta$ ) для кольцевых ребер; высоты ( $h$ ) для спиральных и кольцевых ребер  $c$  30 до 6.8 мм. По результатам исследования сетчатых цилиндрических оболочек на собственные частоты и формы выяснилось, что с увеличением номера частоты

увеличивалось ее значение и число волн в собственной форме. Собственные формы колебаний оболочек имеют симметричную структуру, это объясняется тем, что в сетчатых оболочках семейства ребер с наклоном влево и вправо имеют одинаковый угол наклона к образующей.

Увеличение спиральных ребер в 4 раза приводит к уменьшению значений собственных частот при варьировании высот и толщин. Оболочки с числом пар спиральных ребер в диапазоне от 80 до 240 имеют близкие значения частот (Таблица 1 и Таблица 2).

**Таблица 1 – Собственные формы колебаний и значения частот при варьировании высот**

80 пар спиральных ребер			120 пар спиральных ребер		
$\lambda_1=14.6$ Гц	$\lambda_{18}=42.3$ Гц	$\lambda_{37}=70.5$ Гц	$\lambda_1=13.3$ Гц	$\lambda_{18}=34.4$ Гц	$\lambda_{37}=55$ Гц
160 пар спиральных ребер			320 пар спиральных ребер		
$\lambda_1=13.5$ Гц	$\lambda_{18}=30.8$ Гц	$\lambda_{37}=40.9$ Гц	$\lambda_1=1.1$ Гц	$\lambda_{18}=1.3$ Гц	$\lambda_{37}=2.2$ Гц

**Таблица 2 – Собственные формы колебаний и значения частот при варьировании толщин**

80 пар спиральных ребер			120 пар спиральных ребер		
$\lambda_1=14.6$ Гц	$\lambda_{18}=42.3$ Гц	$\lambda_{37}=70.5$ Гц	$\lambda_1=14.3$ Гц	$\lambda_{18}=41.8$ Гц	$\lambda_{37}=77.5$ Гц
160 пар спиральных ребер			320 пар спиральных ребер		
$\lambda_1=14.8$ Гц	$\lambda_{18}=43.6$ Гц	$\lambda_{37}=40.9$ Гц	$\lambda_1=2.9$ Гц	$\lambda_{18}=7.4$ Гц	$\lambda_{37}=10.5$ Гц

Для проверки результатов полученных в *Ansys Mechanical APDL* были проанализированы и вычислены аналитические значения методике, изложенной в монографии [5] по (1):

$$\omega_{mn}^2 = \frac{a \cdot L}{2 \cdot L_7 \cdot \rho \cdot \delta \cdot h^3} \quad (1)$$

где  $n$  и  $m$  – число полуволн в продольном и поперечном направлении;  
 $a$  – расстояние между осями ребер;  $\rho$  – плотность материала;  $\delta$  – толщина ребер;  $h$  – высота ребер.

На рисунке 2 представлены графики зависимостей собственных частот оболочек от числа спиральных ребер, рассчитанных численно и аналитически.

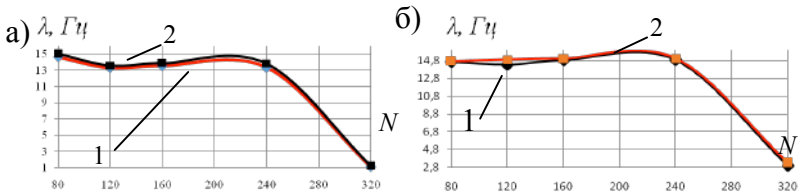


Рис.2 – Графики зависимости собственных частот  $\lambda$  от числа пар спиральных ребер  $N$  при варьировании: а) высот; б) толщин;  
 1 – численный расчет в ANSYSMECHANICALAPDL;  
 2 – аналитический расчет

Анализируя рисунок 2 (а, б) отмечаем, что график полученных значений  $\lambda$  в программном комплексе ANSYS MECHANICAL APDL лежит ниже, чем аналитический расчет. Разница между значениями собственных частот не превышает 2%, следовательно, значения  $\lambda$ , полученные численно в программном комплексе верны.

#### Литература:

1. Барынин В.А., Бунаков В.А., Васильев В.В., Майоров Б.Г. Композитные сетчатые конструкции (обзор)// Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 2001. Вып. 1(123)-2(124). С. 9–16.
2. Васильев В.В. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций/ В.В. Васильев, А.Ф. Разин// Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении.– 2006.
3. А. В. Лопатин, Е. А. Барыльникова. Конечно-элементное моделирование сетчатых цилиндрических оболочек// Решетневские чтения. - Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. - С. 22.

4. Работа в САЕ-пакете ANSYS MECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов: метод. указание / сост.: А.О. Шкловец, В.С. Мелентьев. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 76 с.: ил.

5. Динамическое поведение оболочки из композиционных материалов тетрагональной структуры: монография / М.Н. Немеребаев, М.М. Бекмуратов, С.А. Орынбаев, Е.К. Актаев. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2018. – 134 с.

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСКАВАТОРА–ПОГРУЗЧИКА**

**П.А. Литенко**

**Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, pamaslov@mail.ru**

**Научный руководитель: Маслов Н.А., к.т.н., доцент**

*В работе рассмотрена физика процесса взаимодействия экскаваторного ковша с повышенными силовыми возможностями при различных режимах работы с породой, разработаны алгоритмы расчета производительности, энергоемкости и других параметров для анализа режимов работы и разработки рекомендации по повышению энергетической эффективности экскаватора-погрузчика.*

*The paper considers the physics of the interaction process of an excavator bucket with increased power capabilities under various modes of operation with the rock, developed algorithms for calculating productivity, energy intensity and other parameters for the analysis of operating modes and developing recommendations to improve the energy efficiency of the backhoe loader.*

Целью работы является разработка методики расчета энергетической эффективности экскаватора-погрузчика с активным ковшом.

Задачи работы: установить закономерности процесса разрушения породы типовым ковшом обратной лопаты экскаватора-погрузчика в статическом режиме; установить закономерности процесса разрушения породы ковшом активного действия (далее - КАД) обратной лопаты экскаватора-погрузчика в динамическом режиме работы; установить закономерности процесса разрушения породы КАД экскаватора-погрузчика в статодинамическом режиме работы; разработать алгоритмы расчета производительности, энергоемкости и других параметров для анализа режимов работы и разработки рекомендации по повышению энергетической эффективности экскаватора-погрузчика.

Использование экскаваторов при разработке прочных горных пород, а также экскаваторов-погрузчиков при разработке смерзшихся мягких и рыхлых пород в зимнее время требует специальной подготовки их к выемке. Необходимы специальные машины и технологии, способные разрабатывать прочные породы, либо способные преобразовывать прочную породу в менее прочный массив при разрыхлении или разупрочнении. Традиционные выемочно-погрузочные машины обеспечивают эффективную выемку горных пород, имеющих коэффициент крепости  $f < 1,5 \dots 2$  по шкале М. М. Протодяконова или III категорию согласно классификации горных пород по трудности экскавации. При разрушении горных пород повышенной крепости среди без взрывных способов наиболее перспективны способы, реализующие удар и резание. Повышение эффективности данного способа возможно путем разработки КАД, что позволяет интенсифицировать процесс разрушения и расширить область применения экскаваторов на мерзлых и прочных массивах. Характерной особенностью рабочих органов ударного действия является наличие ударной части, способной накапливать значительные запасы энергии и резко передавать ее в массив, как правило, посредством внедряющегося рабочего инструмента. Конструкция КАД позволяет реализовать несколько режимов при разработке породы. Среди них статический (статическое резание зубьями), динамический (зубья в режиме удара) и статодинамический режимы. Выбор режима работы ковша в зависимости от прочности разрушаемой породы может быть принципиально реализован вручную машинистом экскаватора и (или) автоматически самими гидроударными устройствами. [1-4]

Условия расчета: перемещение ковша происходит равномерно, с постоянной скоростью  $v_k$ ; перемещение зуба относительно ковша при внедрении в породу за время работы зуба происходит равномерно, с постоянной скоростью  $v_z$ ; перемещение зуба при обратном ходе происходит мгновенно; векторы скоростей  $v_k$  и  $v_z$  параллельны.

Расчетная схема ковша приведена на рисунке 1.

На рисунке 1 обозначено:  $F_{01}$  - сила сопротивления породы резанию (касательная составляющая), Н;  $F_{02}$  - сила сопротивления породы резанию (нормальная составляющая), Н;  $F_{zч,к}$  - сила, действующая на ковш со стороны гидроцилиндра поворота ковша, Н;  $G_{к+n}$  - сила тяжести ковша с породой, Н;  $r_{zч,к}$ ;  $r_G$ ;  $r_{01}$ ;  $r_{02}$  - плечи приложения, соответственно сил  $F_{zч,к}$ ,  $G_{к+n}$ ,  $F_{01}$ ,  $F_{02}$ , м. В зависимости от конструктивных особенностей активного зуба, величины затупления, износа и других факторов нормальную проекцию силы  $F_{02}$  на касательную к траектории движения зуба можно выразить как:

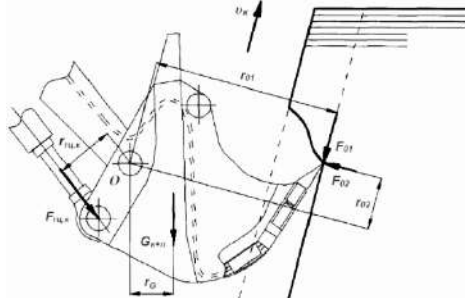


Рис.1 – Схема сил, действующих на ковш

$$F_{02} = K_1 \cdot F_{01}, \quad (1)$$

где  $K_1$  - коэффициент пропорциональности (возрастает при затуплении инструмента и увеличении твердости пород). Сила, реализуемая на режущей кромке ковша для наиболее нагруженного положения, когда ковш наполнен породой:

$$F_{01} = \frac{F_{ГЦ,к} \cdot r_{ГЦ,к} - G_{к+п} \cdot r_G}{r_{01} - K_1 \cdot r_{02}}. \quad (2)$$

За время цикла  $T$  зуб в результате возвратно-поступательных движений совершает внедрение в породу и ее разрушение за время контакта зуба с породой  $t_p$ . Время характеризует продолжительность резания зубом породы за один цикл  $T$ . В зависимости от ряда факторов, например, скоростей зуба  $v_z$  и ковша  $v_k$ , за время  $t_p$  зуб может совершать резание породы при поступательном движении зуба ( $v_z > 0$ ) или за счет статической силы резания зубом в результате движения ковша ( $v_z = 0$ ). В работе рассмотрено оба этих варианта.

Необходимо отметить, что процесс копания породы характеризуется высокой энергоемкостью. Снижение энергоемкости при разработке породы повышенной крепости ведет к росту эффективности использования КАД. Основной задачей конструирования рабочих органов машин является снижение энергоемкости разработки массива. Энергоемкость является объективным критерием степени совершенства выемочно-погрузочных машин. С точки зрения энергоемкости, эффективность разработки породы экскаватором, оборудованным КАД, будет выше, если выполняется условие:

$$a < a_p + a_s, \quad (3)$$

где  $a$  - энергоемкость процесса разработки породы экскаватором с КАД;  $a_p$  - энергоемкость процесса разупрочнения породы и подготовки к экскавации;  $a_3$  - энергоемкость процесса разработки массива экскаватором с обычным ковшом. [5,6] Низкая энергоемкость позволяет снизить затраты на эксплуатацию техники, использовать машины более низкой мощности при сохранении производительности, либо, наоборот, увеличить производительность при неизменной мощности. Таким образом, в качестве критерия оптимизации принята энергоемкость процесса разработки породы. Энергоемкость процесса разработки породы экскаватором:

$$a = a_1 + a_2, \quad (4)$$

где  $a_1$  - энергоемкость, затраченная на движение корпуса ковша (по тяговым силам);  $a_2$  - энергоемкость, затраченная на разрушение массива зубьями. Величины энергоемкости  $a_1$  и  $a_2$  зависят от работы, совершаемой КАД при разработке массива, и объема разрушенной породы.

На основе рассмотренных теоретических сведений разработаны алгоритм расчета энергетической эффективности работы экскаватора-погрузчика (Рисунок 2) и алгоритм расчета энергетической эффективности работы экскаватора-погрузчика с КАД (Рисунок 3).

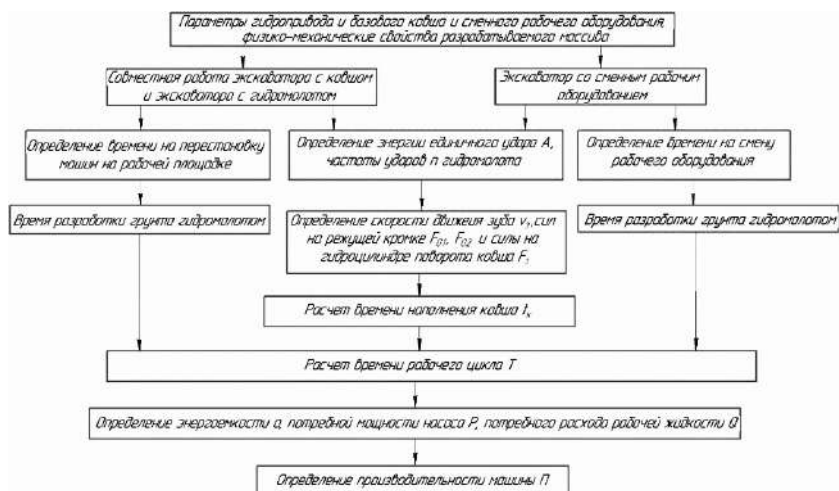


Рис.2 – Алгоритм расчета энергетической эффективности работы экскаватора-погрузчика

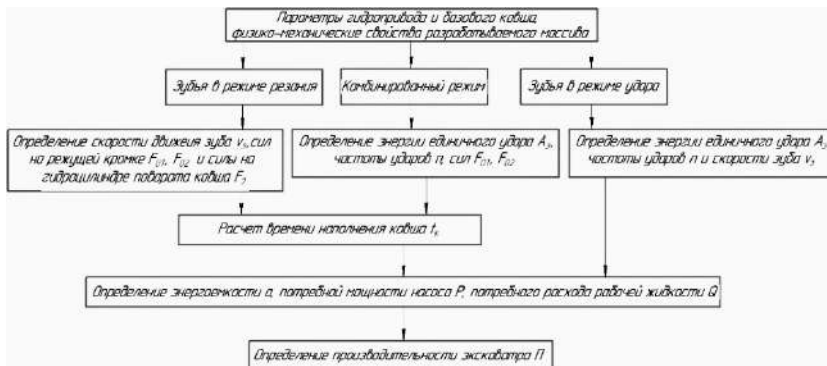


Рис.3 – Алгоритм расчета энергетической эффективности работы экскаватора-погрузчика с активным ковшом

Разработанные алгоритмы позволяют выполнить варианты расчетов производительности, энергоемкости и других параметров экскаватора-погрузчика, которые будут использованы для сравнительного анализа режимов его работы. По результатам анализа будут разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности экскаватора-погрузчика.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № государственной регистрации 121052600390-5

#### Литература:

1. Ванюшев В. В., Маслов Н. А. Применение современных систем рекуперации энергии для повышения энергоэффективности гидравлических экскаваторов // Перспективы инновационного развития угольных регионов России [Электронный ресурс]: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Загл. с этикетки диска. – 15 экз. – 311с., с.186-192.

2. Маслов Н.А. Современные способы питания и управления параллельно работающими гидравлическими двигателями и устройствами горных строительных и дорожных машин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 244 с., с.24-31.



3. *Городилов Л.В., Маслов Н.А., Першин А.И.* Моделирование режимов работы системы гидроударных устройств ковша активного действия гидравлического экскаватора // Перспективы инновационного развития угольных регионов России [Электронный ресурс]: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Загл. с этикетки диска. – 15 экз. – 311с., с.77-83.

4. *Городилов Л.В., Маслов Н.А., Коровин А.Н.* Оценка параметров системы гидроударных устройств ковша активного действия при прямом подключении к гидросистеме экскаватора II размерной группы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 244 с., с.45-51.

5. *Маттис А.Р.* Создание экскаваторных ковшей активного действия: автореф. диссертации д-ра техн. наук. - Новосибирск, 1992. - 46 с.

6. *Городилов Л.В.* Разработка основ теории гидроударных систем объемного типа для исполнительных органов горных и строительных машин: автореф. диссертации д-ра техн. наук. - Новосибирск, 2010. - 42 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙВОСТИ ПЛАСТИН, ОСЛАБЛЕННЫХ ОТВЕРСТИЯМИ**

**О. А. Михайлова, Е. Д. Николаева**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, olya.31122011@yandex.ru**

**Научный руководитель: Кожевников А. Н.**

*Целью данной исследовательской работы является определение оптимальной толщины стенки нервюры летательного аппарата. Стенка нервюры ослаблена четырьмя отверстиями (три соразмерных и одно меньшего диаметра). Между отверстиями закреплены вертикальные силовые уголки для обеспечения устойчивости стенки нервюры. В статье представлены результаты аналитического определения критической нагрузки для двух первых участков рассматриваемой нервюры.*

*The purpose of this research work is to determine the optimal wall thickness of the aircraft rib. The rib wall is weakened by four holes (three practically equal and one smaller than other ones). There are racks between the holes to ensure the rib web stability. Results of the analytical determination stability critical force for first two parts of the rib are presented and discussed.*

В конструкции оперения и механизации летательных аппаратов поперечный силовой набор представлен нервюрами и силовой обшивкой. Конструкция нервюр представляет собой пластину с отверстиями и набором подкрепляющих элементов [1, 2]. Для подобных элементов необходимо оценивать не только прочность или несущую способность, но и жесткость с устойчивостью. Дополнительно обращают внимание на локальные эффекты потери устойчивости вблизи таких концентраторов напряжений, как отверстия больших диаметров [3].

Объектом исследованию выступает модельная нервюра. Геометрия ее стенки представлена на рисунке 1. Дополнительно представлено разбиение пластины стенки на расчетные участки, ограниченные краями нервюры и местами установки подкрепляющих уголков.

Геометрические размеры участков в относительных единицах приведены в таблице 1, где  $a$  – высота,  $b$  – ширина участка,  $c$  – расстояние от левого края участка до центра отверстия,  $d$  – диаметр отверстия.

**Таблица 1 – Геометрические параметры участков**

№ участка	$a$	$b$	$c$	$d$
1	1,24	1,05	0,46	0,59
2	0,99	0,90	0,48	0,45
3	0,76	2,55	0,38	0,34
			1,92	0,06

Далее будут приведены результаты аналитического исследования первого и второго участков. Расчетная схема, условия закрепления и нагружения исследуемых участков представлены на рисунке 2.

Запишем уравнение устойчивости однородной пластины из изотропного материала, нагруженной в вертикальном направлении [4]:

$$D\Delta\Delta w + Nw_{,yy} = 0,$$

где  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$  - цилиндрическая жёсткость на изгиб,  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  - оператор Лапласа.

Граничные условия:

$$x = 0, a \quad w = w_{xx} = 0,$$

$$y = 0, b \quad M_y = -D(w_{yy} + \mu w_{xx}) = 0,$$

$$Q_y^* = Q_y + \frac{\partial H}{\partial x} = -D\{w_{yyy} + (2 - \mu)w_{yxx}\} = 0.$$

Функцию прогиба пластины при потере устойчивости будем разыскивать в виде:

$$w = F(y)\sin\frac{m\pi x}{a}.$$

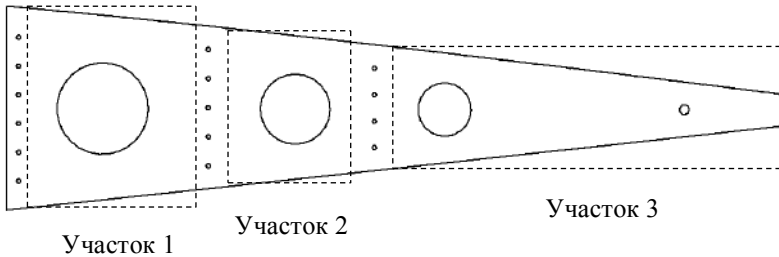


Рис.1 – Геометрия стенки нервюры

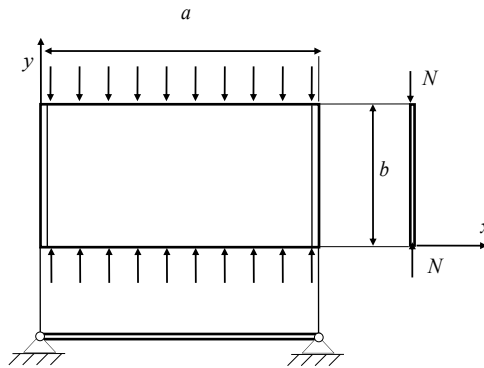


Рис.2 – Расчетная схема

Условия шарнирного опирания кромок при  $x = 0, a$  при этом выполняться будут автоматически, благодаря выбору вида решения исходного бигармонического уравнения. Подставляем вид функции прогиба пластины в уравнение устойчивости и получаем однородное выражение вида [5]:

$$\frac{d^4 F(y)}{dy^4} - 2 \frac{d^2 F(y)}{dy^2} \left( \alpha^2 - \frac{N}{2D} \right) + \alpha^4 F(y) = 0.$$

Решение полученного уравнения для каждой из форм потери устойчивости разыскивают в следующем виде:

$$F(y) = C_1 \sin \gamma y + C_2 \cos \gamma y + C_3 \operatorname{sh} \beta y + C_4 \operatorname{ch} \beta y,$$

$$\text{где } \gamma = \sqrt{\alpha^2 - \frac{N}{2D} - \sqrt{\left(\alpha^2 - \frac{N}{2D}\right)^2 - \alpha^4}},$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{N}{2D} + \sqrt{\left(\alpha^2 - \frac{N}{2D}\right)^2 - \alpha^4}}$$

Подчиняя это решение сформулированным ранее граничным условиям, получим систему четырех однородных линейных уравнений относительно четырех неизвестных констант интегрирования  $C_i$ . Равенство нулю определителя этой системы приводит к характеристическому уравнению, дающему возможность найти собственные значения задачи. Перебирая различные числа полуовла  $m$ , найдем то из них, которое приводит к наименьшему собственному значению задачи: оно и будет являться критическим.

На рисунке 3 приведен график зависимости амплитуды погонной сжимающей нагрузки при варьировании толщины сплошной стенки нервюры для первого и второго расчетного участков. По оси абсцисс откладывается значение половины толщины стенки нервюры. По оси ординат отношение критической нагрузки потери устойчивости к максимальной нагрузке, зафиксированной в конечно-элементном расчете реальной нервюры такой же геометрии, что и в модельной задаче.

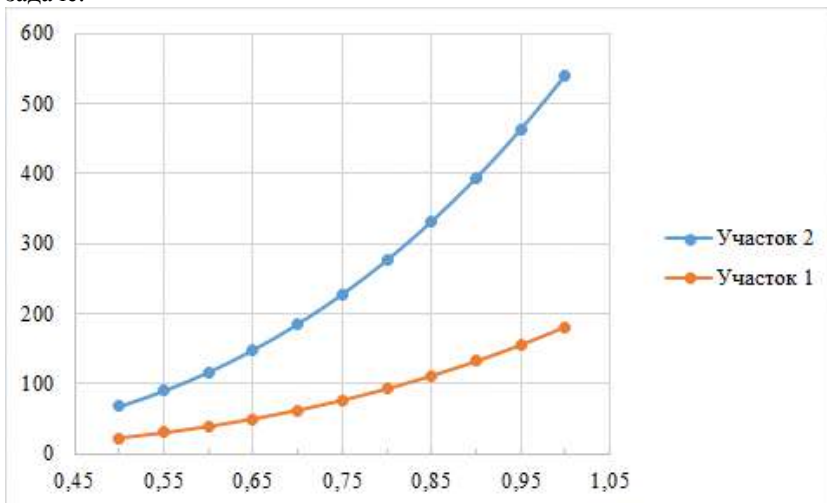


Рис.3 – Графики зависимости критической нагрузки от толщины стенки

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что снижение толщины стенки приводит к нелинейному уменьшению критической нагрузки потери устойчивости, однако даже утончение стенки нервюры вдвое не приводит к тому, чтобы разрушение нервюры происходило вследствие потери устойчивости, а не по превышению несущей способности.

Дальнейшими этапами работы выступит распространение подходов данного исследования на нервюры с отверстиями, поскольку встречающиеся в практике силовые элементы имеют ослабления для снижения общего веса конструкции или обеспечения доступа в технологических целях.

Литература:

1. Niu Michael C. Y. Airframe stress analysis and sizing. – Hong Kong. – 2011. – 704 p.
2. Астахов М. Ф., Карваев А. В. Справочная книга по расчету самолета на прочность. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности. – 1954. – 648 с.
3. Пустовой Н. В., Матвеев К. А. Основы расчета на устойчивость деформируемых систем: учебник. – Н.: Изд-во НГТУ. – 2017. – 372 с.
4. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: «Наука». – 1967. – 984 с.
5. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М.: «Машиностроение». – 1978. – 312 с.

## **РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ТРУБЧАТОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Д.С. Мосиенко**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, mosienko.2016@stud.nstu.ru**

**Научный руководитель: М. А. Леган, д.т.н., профессор**

*При помощи метода конечных элементов решается задача вычисления собственных частот трубчатого центробежного ускорителя с учетом его вращения и проводится анализ результатов.*

*This paper describes the solution to the problem of calculating the natural frequencies of a tubular centrifugal accelerator considering its rotation using the finite element method and analysis of the results.*

## Введение

Метод холодного динамического напыления [1] является перспективным способом нанесения покрытий, имеющим свои преимущества, по сравнению с другими методами. Одним из основных элементов конструкции установки является центробежный ускоритель в виде трубчатого стержня переменного поперечного сечения. В процессе разработки и усовершенствования оборудования возникает необходимость расчета и анализа частот собственных колебаний элементов конструкции. По техническим требованиям ускоритель (Рисунок 1) должен раскручиваться до скорости 30000 оборотов в минуту, что необходимо учитывать при расчете собственных частот.

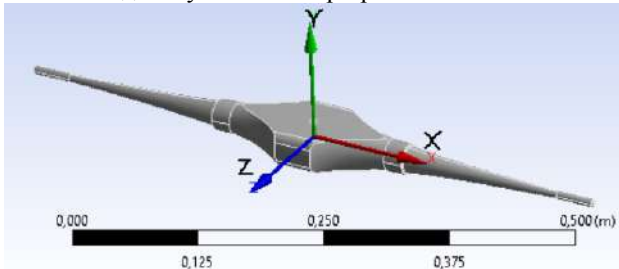


Рис.1 – Модель центробежного ускорителя

Модель ускорителя можно приближенно считать стержнем переменного поперечного сечения. Аналитические модели подобных систем [2-5] демонстрируют нелинейную зависимость собственных частот изгибных колебаний от скорости вращения стержня относительно вертикальной оси  $y$ . Исследуются собственные поперечные колебания. В современной литературе представлены различные стержневые модели данной задачи, как линейные, так и существенно нелинейные. Также разнообразны и методы решения, от классических (Галеркина и Ритца) до численных. В данной работе задача решается с применением метода конечных элементов [6-8].

### 1. Постановка задачи

Задана модель центробежного ускорителя, выполненного из алюминийевого сплава В96Ц1 Т1. Ускорителя вращается в плоскости  $x.o.z$  с угловой скоростью  $\omega$  (Рисунок 2). Будем считать, что граничные условия на центральном посадочном отверстии эквивалентны неподвижному шарниру – ограничены все степени свободы, кроме вращения по оси  $y$ .

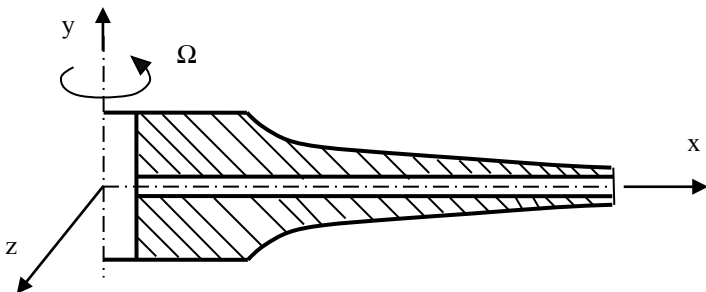


Рис.2 – Расчетная схема

В состоянии покоя система уравнений собственных колебаний КЭ-модели некоторой конструкции может быть представлена в виде:

$$M\ddot{u} + Ku = 0, \quad (1)$$

где  $K$  – матрица жесткости,  $M$  – матрица масс,  $u$  – вектор, содержащий степени свободы модели. Поскольку мы предполагаем гармоническое движение для каждой точки конструкции, выразим две неизвестные, смещение и ускорение, в гармоническом формате:

$$u = \phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i), \quad \ddot{u} = -\omega_i^2 \phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i), \quad (2)$$

где  $\phi_i$  – амплитуды,  $\omega_i$  – частоты колебаний,  $\theta_i$  – фазы колебаний,  $i$  – номер гармоники. Подставляя (2) в (1), получим типичную проблему собственных значений:

$$(K - \omega_i^2 M)\phi_i = 0, \quad (3)$$

где  $\omega_i$  – собственные числа (частоты),  $\phi_i$  – собственные вектора. Для нахождения собственных частот необходимо, чтобы выполнялось уравнение (4)

$$\det[K - \omega_i^2 M] = 0. \quad (4)$$

Если система в состоянии вращения с угловой скоростью  $\Omega$ , то необходимо учесть напряжение, которое возникает вследствие действия центробежных сил  $F$ . Для этого перед модальным анализом

выполняется статический анализ, то есть определяется напряженное состояние конструкции согласно уравнению (5)

$$Ku = F . \quad (5)$$

Состояние предварительного напряжения изменяет жесткость конструкции за счет добавления матрицы жесткости от напряжений  $S$  к исходной жесткости конструкции  $K$  по формуле (6)

$$[(K + S) - \omega_i^2 M] \phi_i = 0 \quad (6)$$

После учёта предварительного нагружения вычисляются собственные числа и вектора с помощью уравнения, аналогичного (4).

## 2. Решение

В таблице 1 приведены данные расчёта частот собственных колебаний с первой по четвертую гармоники при заданной скорости вращения  $\Omega$ .

**Таблица 1 – Собственные частоты**

$\Omega$ , [рад/с]	$\Omega$ , [Гц]	$\omega_1$ [Гц]	$\omega_2$ [Гц]	$\omega_3$ [Гц]	$\omega_4$ [Гц]
0	0	598.6	613.1	631.3	760.7
100	15.915	598.7	613.2	631.4	760.8
200	31.831	600	614.5	631.9	761.4
500	79.577	609	624.5	638.1	770
750	119.366	623	638.9	647.3	782.4
1000	159.155	641	659.7	658.3	799.5
1250	198.944	664	682.1	675.1	820.8
1500	238.732	690.5	709.7	693.1	845.4
1750	278.521	719.5	740.4	713.3	874.4
2000	318.31	750.7	773.7	735.3	905.8
2500	397.887	817.9	845.9	783.6	976
3000	477.465	889	923	835.7	1053.8

На рисунке 3 графически представлены зависимости частот собственных колебаний от скорости вращения ускорителя в соответствии с формами собственных колебаний. Формы собственных колебаний с первой по четвертую приведены на рисунке 4. Кривая 1 соответствует собственной форме а), кривая 2 – б), кривая 3 – в), кривая 4 – г).

Видно, что в состоянии покоя наименьшей собственной частоте соответствуют колебания ускорителя из плоскости вращения.



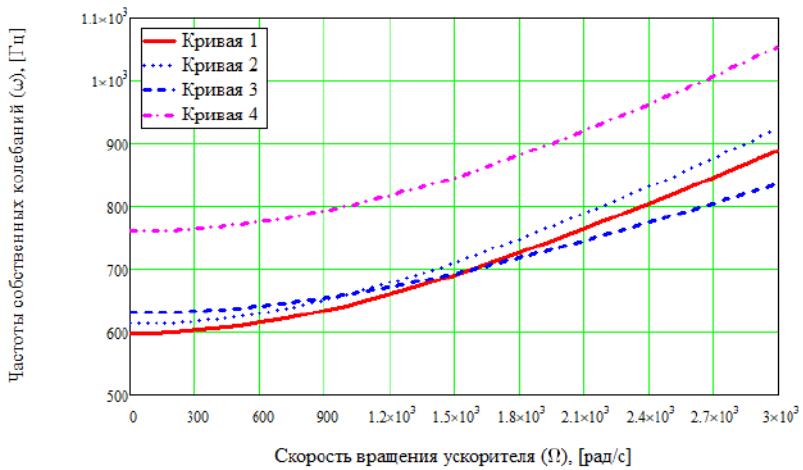


Рис.3 – Зависимости собственных частот от скорости вращения

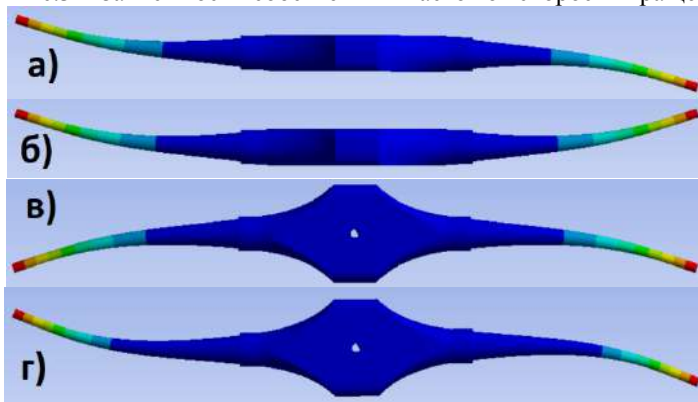


Рис.4 – Собственные формы колебаний

Стоит отметить, что частоты растут с разной интенсивностью и при скорости вращения около 1700 рад/с наименьшей собственной частоте будут соответствовать колебания ускорителя в плоскости вращения. Это является характерной чертой механических систем при наличии центробежных сил, влияющих на собственные частоты и формы колебаний быстровращающихся конструкций. Также важно отметить, что при частотах вращения ускорителя до 3000 рад/с, значение низшей собственной частоты строго больше соответствующей частоты вращения, что говорит об отсутствии критических точек в заданном диапазоне скоростей.

#### Литература:

1. Оптимизация установки для холодного динамического напыления [Текст] / Д.С. Мосиенко, М.А. Леган // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ //Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – С. 29–31.
2. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с., ил.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем / Под. Ред. В.В. Болотина. 1978. 352 с., ил.
4. Яганов В.М. Собственные колебания вращающегося упругого стержня с демпфером // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2019. – том 11, №2. – С. 36–43.
5. Yardimoglu B. Vibration analysis of rotating tapered Timoshenko beams by a new finite element model // Shock and Vibration. – 2006. N 13. – P. 117-126.
6. Study of Modal Characteristics of a geared rotor system / Ankur S., Anand P., Manoj C. // Procedia Technology. – 2016. – N 23. – P. 225-231. - doi: 10.1016/j.protcy.2016.03.021.
7. Sarkar K., Ganguli R. Rotating beams and non-rotating beams with shared eigenpair for pinned-free boundary condition // Meccanica. 2013. V. 48. № 7. P. 1661–1676.
8. Rao S.S., Gupta. R.S. Finite element vibration analysis of rotating Timoshenko beams // J. Sound Vib. 2001. V. 242. № 1. P. 103–124.

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ СЛОЕВ

Д.А. Некрасова

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, darik-1999@mail.ru

Научный руководитель: Олегин И. П., д.т.н., доцент

*Работа посвящена проблеме оценки прочности композитных тонкостенных стержней замкнутого профиля аналитическим методом и методом конечных элементов. В результате аналитических процедур, основанных на ряде допущений, получены осредненные свойства композитного материала, силы и моменты сил, при которых происходят первичное и полное разрушение. С помощью трехмерной конечно-элементной модели даны рекомендации относительно пределов применимости приближенного решения.*

*The work is devoted to the problem of evaluating the strength of composite thin-walled closed-profile rods by analytical and finite-element methods. The averaged properties of composite material, forces and moments of forces at which primary and complete failure occur as a result of analytical procedures based on a number of assumptions obtained. Recommendations are given concerning the limits of applicability of the approximate solution based on the three-dimensional finite-element model.*

Одним из видов подкрепляющих элементов конструкций являются тонкостенные стержни открытого и замкнутого профиля. Целью работы является проверка достоверности приближенного подхода к оценке прочности тонкостенных многослойных трубчатых стержней из композитного материала, предложенного в работах [1,2], путем сравнения решения аналогичных задач методом конечных элементов и на основе этого разработать численно-аналитическую методику расчета на прочность таких элементов конструкций.

Работа состоит из двух частей.

В первой части работы на основе гипотезы о деформировании контура поперечного сечения стержня, введенной в [1, 2], приводятся основные соотношения, определяющие напряжения в отдельных слоях [3] при одноосном сжатии, кручении и поперечном изгибе. Зная эти напряжения, можно определить по достаточно простым формулам внешние нагрузки, вызывающие либо разрушение связующего в слое (первичное разрушение), либо разрушение волокон (полное разрушение) используя соответствующие критерии прочности слоя.

Вторая часть работы посвящена численному исследованию задачи методом конечного элемента [4], основная цель которого заключается в определении деформационных характеристик контура поперечного

сечения и усредненных напряжений по толщине стенки полого стержня, при основных видах внешних силовых факторов, действующих на стержень. Для создания модели и проведения анализа методом конечных элементов (КЭ) была выбрана универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS Workbench [5, 6].

В результате решения задачи аналитическим и численным методом делаются выводы о возможности определения деформаций контура сечения приближенным методом и дальнейшего использования этого метода для оценки прочности многослойного стержня путем сплошного анализа однонаправленных слоев, образующих стержень.

Типовая расчетная модель стержня представляет собой цилиндрический стержень (рис.1), образованный из слоев композита с заданными углами перекрестного армирования и слоев с армированием  $90^0$ , механическими характеристиками материала слоев и заданными толщинами слоев, находящийся под действием силовых факторов:  $N$  – осевая сила,  $M_{кр}$  – крутящий момент,  $M_{изг}$  – изгибающий момент,  $Q$  – перерезывающая сила.

В данной работе рассматриваются стержни из стеклопластика и углепластика с известными прочностными и жесткостными характеристиками, углами армирования  $[90 \ +30 \ -30 \ +30 \ -30]$ , толщинами слоев  $[0,1 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5]$  и диапазоном изменения отношения толщины стенки стержня к радиусу  $0,1; 0,2; 0,05$ .

Приближенный метод расчета основан на введении гипотезы плоских сечений. Считается, что каждое поперечное сечение поворачивается в своей плоскости на некоторый угол как жесткое целое. Этот угол поворота для различных сечений будет различным. Если контур сечения стержня не подкреплен, следует принять  $\sigma_s = 0$ . Тогда закон Гука имеет вид:

$$\sigma_z = E_z \cdot \varepsilon_z, \quad \tau_{zs} = G_{zs} \cdot \gamma_{zs}, \quad \varepsilon_s = -\mu_{zs} \cdot \varepsilon_z, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_z$  – относительная деформация в осевом направлении;  $\varepsilon_s$  – контурная деформация;  $\gamma_{zs}$  – деформация сдвига.

Определив деформации через заданные силовые факторы, а затем усредненные напряжения из (1), можно найти напряжения в каждом слое [3]  $\sigma_1^k, \sigma_2^k, \tau_{12}^k$ , отнесенные к локальной системе координат, связанных с направлением армирования слоя,  $k$ -номер слоя.

При оценке прочности по первичному разрушению использовался критерий Хилла

$$\frac{(\sigma_1^k)^2}{\sigma_{B1}^2} + \frac{(\sigma_2^k)^2}{\sigma_{B2}^2} - \frac{\sigma_1^k \sigma_2^k}{\sigma_{B1} \sigma_{B2}} + \frac{(\tau_{12}^k)^2}{\tau_{B12}^2} = 1 \quad (2)$$

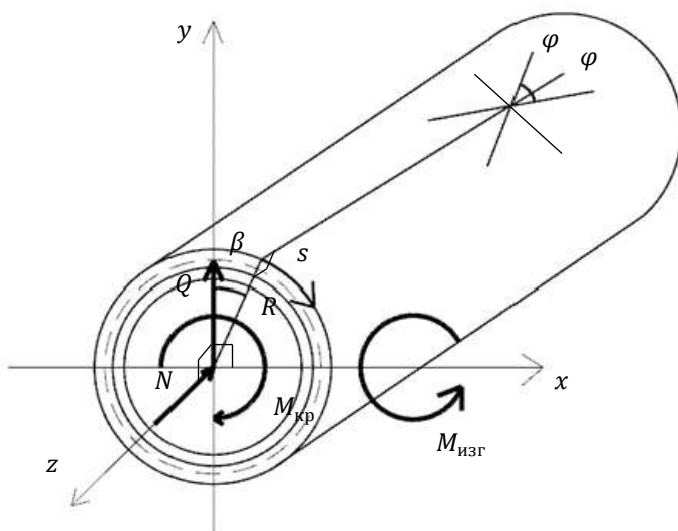


Рис.1 – Цилиндрический стержень радиуса R

Полное разрушение определялось по критерию максимальных напряжений, при этом все жесткостные характеристики материала полагались равными нулю, кроме модуля Юнга ( $E_1 \neq 0$ ).

Основные результаты работы:

1. Определены нагрузки, вызывающие первичное и полное разрушение, а также слои, в которых эти разрушения произойдут. Анализ проведен для двух типов однонаправленных слоев.

2. Создана трехмерная модель, соответствующая расчетной схеме рис.1 с использованием гексагональных элементов SOLID186 второго порядка. Проведено сравнение результатов аналитического решения и решения методом КЭ для случая одноосного сжатия, кручения и поперечного изгиба. Для каждого из этих случаев на основании полученного решения даны рекомендации относительно пределов применимости приближенного решения, основанного на гипотезе не деформируемости контура сечения.

#### Литература

1. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1988. — 272 с.

2. V.V. Vasiliev, E. Morozov. Advanced Mechanics of Composite Materials. — Elsevier, 2007. — 504p.
3. Максименко В. Н., Олегин И. П., Пустовой Н.В. Методы расчета на прочность и жесткость элементов конструкций из композитов: Учебник НГТУ – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2015. – 424 с.
4. Присекин В.Л., Расторгуев Г.И. Основы метода конечных элементов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 124 с.
5. Басов, К.А. ANSYS. Справочник пользователя. Изд. 2-е. - Москва, 2005. - 640 с.
5. Koutromano I. Fundamentals of Finite Element Analysis – Croydon: CPI Group (UK) Ltd., 2018. – 710 с.
6. Chen X., Liu Y. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2019. – 473 с.

## **ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, РАЗРУШЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ**

**Ю.В. Немировский**

**Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [nemiryury@mail.ru](mailto:nemiryury@mail.ru)**

*Исследуются некоторые особенности процессов деформирования, разрушения и оптимального (рационального) проектирования гибридных композитных стержней при квазистатических нагружениях осевыми нагрузками. Гибридные продольно слоистые стержни представляют из себя наборы жестко связанных по боковым поверхностям фазовых конструктивных материалов цилиндрической и (или) призматической формы. При оценке работоспособности гибридных стержней здесь впервые используются деформационные критерии, связанные с эксплуатационными требованиями работы рассматриваемых конструкций. Выделены три важных класса конструкций по требованию эксплуатации. Класс предельно упругих конструкций, класс конструкций с начальными процессами разрушения и класс конструкций с полным разрушением. Для каждого класса получены общие формы зависимости между нагрузками, напряжениями и деформациями фазовых материалов, и топологическими характеристиками распределения материалов по поперечному сечению гибридных стержней. На их основе впервые получены, при учете собственных весов фаз, критерии рациональности и жесткости минимального веса и стоимости проектируемых гибридных*

стержней. Рассмотрены примеры решения задач для двух и трехфазных структур с двух симметричным расположением фаз в поперечном сечении стержня.

*Some features of the processes of deformation, fracture and optimal (rational) design of hybrid composite rods under quasi-static axial loads are investigated. Hybrid longitudinally layered rods are sets of phase structural materials of a cylindrical and (or) prismatic shape rigidly connected along the lateral surfaces. In assessing the performance of hybrid rods, here for the first time deformation criteria are used, associated with the operational requirements of the work of the structures under consideration. Three important classes of structures on demand are identified. The class of ultimately elastic structures, the class of structures with initial processes of destruction and the class of structures with complete destruction. For each class, general forms of dependencies between loads, stresses and deformations of phase materials, and topological characteristics of the distribution of materials over the cross-section of hybrid rods are obtained. On their basis, for the first time, taking into account the own weights of the phases, criteria of rationality and rigidity of the minimum weight and cost of the designed hybrid rods. Examples of solving problems for two and three-phase structures with two symmetrical phase positions in the cross-section of a rod are considered.*

Стержневые элементы в качестве скелетной основы разнообразных объектов широко используются во многих отраслях авиакосмической, машино- и судостроительной техники и в производстве объектов индустриального и гражданского строительства. Совершенствование создаваемых проектов опиралось при этом на разработки теории оптимального проектирования, в основе которой были заложены два важных предположения: об однородности конструкционных материалов и о пренебрежимом влиянии их собственного веса на форму оптимального проекта, которые в целом ряде случаев приводили к заведомо недостоверным результатам. В течение последних десятилетий жесткие экономические и ресурсные ограничения приводят к необходимости создания и внедрения более эффективных несущих элементов слоистых и слоисто-волоконистых конструкций (обычно называемых композитными конструкциями), которые надежно функционируют в широком диапазоне эксплуатационных ситуаций. Используя достижения современной технической физики, химфизики, строительной механики и материаловедения в настоящее время ускоренно и успешно развиваются многие технологии создания многофазных конструкций. Технологии, основанные на принципах склейки, наплавок, поверхностных упрочнений, разнообразных типов сварок, газодинамических и плазменных способов нанесения покрытий, уже сегодня позволяют надежно, и без каких-либо серьезных ограничений по топологическим параметрам фазовых материалов

создавать на больших площадях гибридные пакеты из наборов практически любых существующих конструкционных металлов и сплавов, полимерных материалов и керамик. При анализе деформированных, вплоть до разрушения, в условиях осевого нагружения гибридных длинных (с длиной  $l$  композитных стержней) будем рассматривать в качестве образцов-свидетелей  $n$ -фазные конструкции с двух симметричными в плоскостях поперечного сечения стержня структурами расположения фаз, неизменными вдоль оси стержня, и в силу малости поперечных размеров фаз будем рассматривать кусочно-постоянные поля поперечных напряжений  $\sigma_i$  и деформирований  $\varepsilon_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) в фазовых слоях. В силу отсутствия осевого проскальзывания фаз, для осевых перемещений  $U_i(x)$  точек фазовых материалов при деформировании образца-свидетеля будем иметь равенства

$$\begin{aligned} U_1(x) &= U_2(x) = \dots = U_n(x) = U(x), \\ \varepsilon_1(x) &= \varepsilon_2(x) = \dots = \varepsilon(x), \quad (0 \leq x \leq l), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\varepsilon(x) = \frac{dU(x)}{dx}$ ,  $\varepsilon_1(x) = \frac{dU_1(x)}{dx}$ , ...,  $\varepsilon_n(x) = \frac{dU_n(x)}{dx}$  – продольные деформации.

Если  $F_i$  – площадь в сечении образца-свидетеля, занятая материалом  $i$ -ой фазы, то продольное усилие  $N(x)$  в образце-свидетеле связано с напряжениями  $\sigma_i(x)$  выражением

$$N(x) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(x) F_i(x) \tag{2}$$

и оно должно удовлетворять уравнению

$$\frac{dN}{dx} + \beta \sum_{i=1}^n \rho_i F_i = 0, \tag{3}$$



где  $\rho_i$  – удельная плотность  $i$ -го фазового материала, а  $\beta = \begin{cases} 1, & \text{при учете собственных весов фаз} \\ 0, & \text{при неучете собственных весов фаз} \end{cases}$ .

Если при нагружении стержня конец  $x = 0$  закреплен от смещения, а к концу  $x = l$  прикладывается усилие  $P$ , то должны быть выполнены граничные условия

$$U(0) = 0, \quad (4)$$

$$N(l) = P. \quad (5)$$

Для замыкания системы разрешающих уравнений необходимо их дополнить уравнениями физического состояния фазовых материалов, в виде диаграмм деформирования  $\sigma \sim \varepsilon$ , которые зависят как от собственных свойств материалов, так и от требований по допускаемым условиям эксплуатации (в частности, режимов упругого и неупругого деформирования при растяжении и сжатии). Некоторые типы конструкционных материалов ведут себя существенно по-разному и это необходимо учитывать [2,3,8,9]. Однако, большинство конструкционных материалов при растяжении и сжатии ведут себя практически одинаково, и для них, в качестве диаграмм деформирования могут быть использованы удобные для расчетов нечетные функции  $\sigma = f(\varepsilon)$ . К ним, в частности, относятся зависимости упругого деформирования [5,8,11]

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & |\varepsilon| \leq \varepsilon^* \\ 0, & |\varepsilon| > \varepsilon^* \end{cases}. \quad (6)$$

Закон кубической параболы

$$\sigma = E\varepsilon + B\varepsilon^3, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon^{**}, \quad (7)$$

$$B = -\frac{1}{3} \frac{E}{(\varepsilon^*)^2}, \quad \varepsilon^* = \frac{3}{2} \frac{\sigma^*}{E}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon^*$  – предельная деформация упрочнения,  $\sigma^*$  – предел прочности,  $\varepsilon^{**}$  – деформация разрушения и соответствующие характеристики  $\sigma^*$ ,

$E^*$ ,  $\varepsilon^*$ ,  $\varepsilon^{**}$  должны быть отмечены индексом соответствующего фазового материала. Подставляя эти зависимости в уравнение (3) после интегрирования с учетом граничных условий при одной и той же допустимой нагрузке, после исключения лишних переменных для фазовых площадей, получим зависимость нагрузки от площади первой фазы. Определяя максимум соответствующей предельной нагрузки разрушения и площади всех фаз при этой предельной нагрузке, пользуясь найденными площадями можем определить вес  $V$  найденного проекта по формуле  $V = \sum_{i=1}^n \rho_i F_i$  и стоимость его производства по формуле  $C = \sum_{i=1}^n c_i \rho_i F_i$ , где  $c_i$  – удельная стоимость  $i$ -го фазового материала. Если принять все фазы одинаковыми, то получим эталонный проект веса  $V_0$  и стоимости  $C_0$  с заданной несущей способностью  $P^*$  и по относительным характеристикам  $V/V_0$  и  $C/C_0$  усовершенствующих проектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-01-00038

Литература:

1. Немировский Ю.В. Обратные задачи механики тонкостенных конструкций // Механика композиционных материалов, 2001, №5/6, с. 655-668
2. Немировский Ю.В. Синтез плоских композитных ферменных конструкций // Проблемы оптимального проектирования сооружений. Доклады Всероссийского семинара в двух частях. IV Всероссийский семинар, 3-5 апреля 2002, НГАСУ, Новосибирск, 2002, с. 274-281
3. Немировский Ю.В., Мищенко А.В., Вохмянин И.В. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем. Новосибирск, НГАСУ, 2004, 488 с.
4. Король В.К., Гильдергорн М.С. Основы производства многослойных металлов. М. Металлургия, 1978, 237 с.
5. Немировский Ю.В. Прогнозирование нелинейного деформирования гибридных композитных материалов // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела. Труды второй Международной конференции / Казанский госуниверситет, Казань, 2009.
6. Мищенко А.В., Немировский Ю.В. Структурно неоднородные профилированные стержневые системы. Palmatium Academic Publishing, 2016.

7. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. М.-Л., 1967

8. Немировский Ю.В. Метод расчета композитных стержневых систем из разномодульных материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы Всероссийской научной конференции / ТГУ, Томск, 2006, с. 288-290

9. Немировский Ю.В. Допредельное деформирование армированных бетонных конструкций // Вестник Чувацкого государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, 2018, №3(37), с. 26-37

10 Немировский Ю.В., Моховнев Д.В. Устойчивость гибридного композитного стержня в условиях высоких температур // Омский научный вестник, 2019, т. 3, №4, с. 16-25

11. Немировский Ю.В. Прогнозирование нелинейного деформирования гибридных композитных стержневых элементов // Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов. Труды Всероссийской юбилейное научно-технической конференции, посвященной 70-летию со дня основания СибНИА (Новосибирск, СибНИА, 2011, с. 261-263)

## **АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЩЕБНЕОЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

**Р.А. Почтаренко**

**Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, [namaslov@mail.ru](mailto:namaslov@mail.ru)**

**Научный руководитель: Маслов Н.А., к.т.н., доцент**

*В работе выполнен анализ статистики неисправностей щебнеочистительных машин, неисправности машин распределены узлам, системам и группам, неисправности узлов также распределены по группам, выполнен анализ неисправностей машин по сформулированным критериям, разработаны рекомендации по ведению статистики и предотвращению неисправностей машин.*

*The paper analyzes the statistics of rubble cleaning machine failures, machine failures are allocated to units, systems and groups, unit failures are also allocated to groups, machine failures are analyzed according to the formulated criteria, recommendations for maintaining statistics and preventing machine failures are developed.*

Целью работы является анализ статистики неисправностей щетнеочистительных машин (далее - ЩОМ).

Задачи работы: распределить неисправности ЩОМ по узлам и системам; распределить неисправности ЩОМ по группам; распределить неисправности узлов ЩОМ по группам; выполнить анализ неисправностей ЩОМ по сформулированным критериям; разработать рекомендации по ведению статистики и предотвращению неисправностей ЩОМ.

В работе выполнен анализ статистики неисправностей ЩОМ предприятия ПЧМ Алтай. На этом предприятии эксплуатируются щетнеочистительные машины RM-80 и RM-2002 австрийского производства, а также отечественные ЩОМ СЧ-600, СЧ-601 и ЩОМ-1200. Всего в парке предприятия восемь ЩОМ.

С использованием статистических таблиц выполнено распределение неисправностей ЩОМ по узлам и системам (Рисунок 1). На рисунке 1 обозначено: РО - рабочее оборудование; ДВС - двигатель внутреннего сгорания; ГС - гидравлическая система; ЭО - электрооборудование; ПРУ - подъемно-рихтовочное устройство; ХО - ходовое оборудование.

Сделан вывод о том, что наиболее проблемным по отказам узлом является рабочее оборудование (выгребное устройство) ЩОМ (далее - РО). На него приходится половина неисправностей всех ЩОМ. Основные неисправности связаны с обрывом, слетом и заклиниванием рабочего органа (баровой цепи) ЩОМ. Это происходит из-за попадания посторонних предметов из вырезаемой балластной призмы верхнего строения железнодорожного пути в баровую цепь, а также из-за недостаточного натяжения баровой цепи.

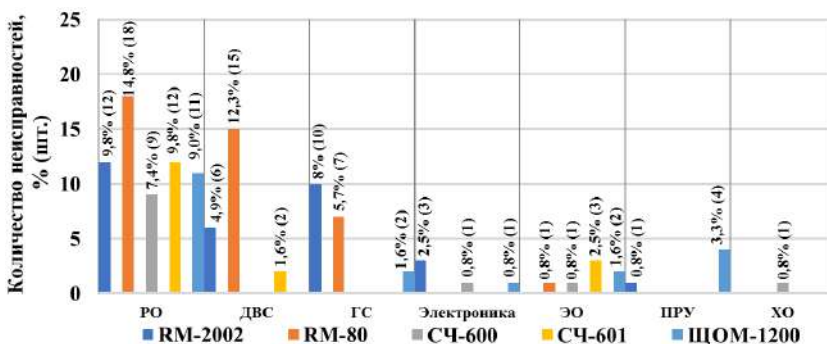


Рис.1 – Диаграмма распределения неисправностей щетнеочистительных машин по узлам и системам

Выполнено распределение неисправностей ЩОМ по группам (Рисунок 2). Предложено разделить неисправности ЩОМ на механические, гидравлические, электрические, электронные и неустановленные. [1-6] Преобладающими неисправностями ЩОМ являются механические неисправности.

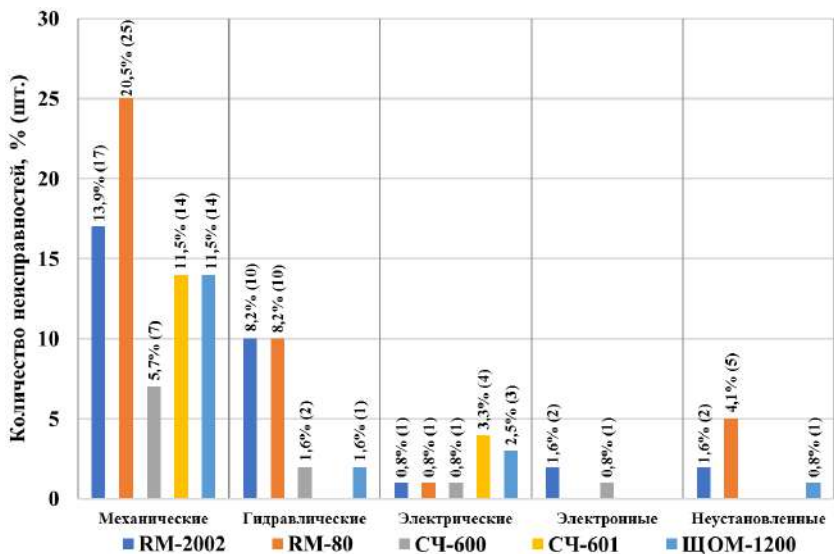


Рис.2 – Диаграмма распределения неисправностей  
щебнеочистительных машин по группам

Механические неисправности (63,1%) - неисправности подшипников и корпусов, валов насосов и гидромоторов, штоков гидроцилиндров. Механические неисправности связаны с некачественным изготовлением, ремонтом, сборкой узлов и превышением допустимой нагрузки. Последствия износы (например, коррозионное истирание), изломы (усталостные и хрупкие) деталей. Гидравлические неисправности (19,6%) - неисправности качающих, вращающих и поступательно движущихся узлов гидромашин; трубопроводов, уплотнений. Они связаны с превышением давления в гидравлической системе, засоренностью гидравлического масла (далее - масла), в том числе попадания воды в масло. Последствия: износы и изломы деталей гидромашин, разрывы трубопроводов, разгерметизация соединений. Электрические неисправности (8,2%) - неисправности электрических кабелей и их соединений, блоков питания. Они связаны с отсутствием контактов, обрывов и обгоранием кабелей, короткими замыканиями.

Последствия: например, не включается, включается и движется неверном направлении, самопроизвольно включается и движется устройство. Электронные неисправности (2,5%) - неисправности плат, контроллеров и компьютеров. Они связаны с превышением напряжения в устройствах, короткими замыканиями. Последствия: выгорание или сгорание плат, котроллеров и компьютеров. Неустановленные или неуказанные неисправности (6,6%) - неисправности, которые произошли по неустановленным причинам, например, заклинивание деталей по неустановленным причинам.

Систематический анализ последствий неисправностей предполагает логическое определение причин неисправностей. Последствиями неисправностей являются: деформация, срез, заедание деталей или образование задиров на их поверхностях. Срез - следствие хрупкого или усталостного разрушения. Хрупкое разрушение возможно из-за внезапного увеличения нагрузки, которая превышает резервы прочности материала. Усталостное разрушение является результатом длительного превышения допускаемой нагрузки. Изучение кристаллической структуры поверхности и формы деформаций позволяет определить причины, которые провоцируют разрушение. [1-6]

С использованием статистических данных выполнено распределение неисправностей по группам двух наиболее проблемных узлов ЩОМ - РО и ДВС. Преобладающими неисправностями РО и ДВС являются механические неисправности. ДВС - второй по суммарному количеству неисправностей проблемный узел рассматриваемого парка ЩОМ. Гидравлические неисправности занимают второе место по числу неисправностей РО и ДВС.

Полученные результаты анализа статистики неисправностей ЩОМ:

1. Рабочее оборудование - наиболее проблемный по отказам узел ЩОМ (51%). На втором месте - ДВС (18,8%). На третьем месте - гидравлическая система (13,7%).

2. Преобладающими являются механические неисправности (61%). На втором месте - гидравлические (23%). На третьем месте - электрические, электронные и неуказанные (16%).

3. Наибольшее число неисправностей РО и ДВС - механические (по 88,7 и 65,2%). На втором месте - гидравлические (РО) и неустановленные (ДВС) по 6,5 и 21,7% соответственно. На третьем месте - неустановленные (РО) и гидравлические (ДВС) по 3,2 и 8,7% соответственно.

Разработаны рекомендации по ведению статистики и предотвращению неисправностей ЩОМ. В частности, количество

неустановленных причин можно уменьшить, если устранить недостатки статистических таблиц: ввести разделение на графы: «группа отказов», «отказавший элемент», «последствие отказа», «причина отказа» (одно и то же последствие может иметь разные причины!); не допускать ошибки и неточности (например, вместо причины или последствия отказа не указывать способ его устранения); использовать единую терминологию и сокращения названий.

В результате анализа неисправностей выявлено, что существуют проблемы при эксплуатации ЩОМ. Основная проблема – это внезапные неконтролируемые неисправности. Предложены решения: мониторинг параметров работы узлов ЩОМ с целью прогнозирования отказов; контроль качества изготовления, ремонта, монтажа узлов ЩОМ, а также модернизация систем и узлов ЩОМ для ограничения динамических нагрузок. Второстепенная проблема. Постепенно развивающиеся неконтролируемые неисправности. Предложено решение: периодическая диагностика приводов ЩОМ. Реализация предложенных решений позволит рассчитывать на снижение количества производственных и эксплуатационных отказов. Сами отказы будут постепенно развивающимися, контролируемыми и параметрически определяемыми датчиками. При этом отказы будут заблаговременно предотвращаться, например, за 10% по времени от предполагаемого факта возникновения. Такие отказы будут иметь некритические экономические последствия (необходимость ремонта узла, по фактическому состоянию).

Внедрение в процесс эксплуатации ЩОМ дискретной или непрерывной диагностики ее состояния, а также модернизация систем и узлов ЩОМ для ограничения динамических нагрузок позволит: резко снизить эксплуатационные расходы; повысить годовую эксплуатационную производительность ЩОМ; снизить трудоемкость ремонтных работ.

#### Литература:

1. *Маслов Н. А.* Анализ неисправностей выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 // Политранспортные системы: М-лы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия-ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на дальнем востоке». – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015, с.704-708.
2. *Маслов Н. А.* Анализ механических неисправностей пластинчатых гидромашин путевой техники // Вестник СГУПС, 2015. - № 2, с.53-59.

3. *Абрамов А. Д., Маслов Н. А.* Технологическое обеспечение эксплуатационной надежности выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 // Главный механик, 2015. - № 10, с.48.-53.

4. *Маслов Н. А.* Анализ неисправностей пластинчатых гидромашин путевой техники, вызванных чрезмерным давлением, аэрацией гидравлического масла и кавитацией // Вестник СГУПС, 2016. - № 1, с.5-15.

5. *Маслов Н. А.* Анализ неисправностей путевой техники // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, Новосибирск, 2016. - № 3, т. 2, с.114-120.

6. *Маслов Н. А.* Анализ неисправностей пластинчатых гидромашин путевой техники, вызванных загрязнением твердыми частицами, обводнением, вязкостью масла и использованием несоответствующих масел // Вестник СГУПС, 2017. - № 3, с.55-65.

## **ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ П-ОБРАЗНЫХ МНОГОГРАННЫХ ОПОР НА ОТГЯЖКАХ**

**Д.Е. Решетников**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, Kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru**

**Научный руководитель: Кожевников А.Н., ст. преп.**

*В данной работе рассматриваются особенности деформирования опоры сверхвысокого класса напряжения. Опора рассмотрена с механической точки зрения. Представлено описание особенностей монтажа опоры. Изучены проблемные элементы конструкции. Предложено объяснение зафиксированному разрушению талрепов. Сформулированы задачи для дальнейшего исследования в рамках предложенной тематики.*

*In this paper, the features of the deformation of an ultra-high voltage class overhead line pylon are considered. The pylon is considered as a complex mechanical system. Description of the pylon assembly features is provided. Often damaged pylon elements are specified. Occurred damages of the lanyards are presented and discussed. Additional tasks for further analysis are specified.*

В XXI веке невозможно представить жизнь без разнообразных бытовых и промышленных приборов, использующих электрическую энергию. Передача электричества происходит с помощью электрических сетей, которые включают в себя различные преобразователи, распределительные устройства и линии электропередачи.



В рамках представленной работы рассматриваются непосредственно высоковольтные линии электропередачи. Основное внимание уделено многогранной П-образной опоре на оттяжках 2МП500-1В (рис. 1). Данная опора представляет собой две конические стойки из многогранной трубы, соединенные горизонтальной траверсой и набором ветровых связей.

Опора 2МП500-1В относится к опорам сверхвысокого класса напряжений (500 кВ). Необходимость в опорах сверхвысокого класса обусловлена потребностью в магистральной передаче электрической энергии от ГЭС или АЭС до распределительных устройств. Дополнительным применением конструкций подобных размеров являются переходы воздушных линий электропередачи через реки или другие особенности ландшафта.

С точки зрения механической системы опор состоит из двух металлических стоек переменного сечения, траверсы и двух гибких перекрестных внутренних связей, которые повышают боковую устойчивость опоры [1]. Кроме того, внутренние связи повышают жесткость опоры за счет создаваемого натяжения.

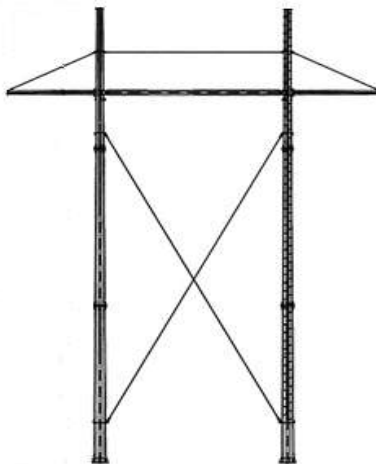


Рис.1 – Опора 2МП500-1В

Опора испытывает нагрузки горизонтальные (вдоль траверсы), вертикальные.

В данной опоре внутренние связи образованы с помощью элементов оттяжек, талрепов, болтов, гаек и шайб. В качестве элементов оттяжки используются тросы диаметром 20 мм. Талреп (рис. 2) представляет собой устройство для натяжения гибких элементов конструкции на

основании применения винтовой пары с фиксированным моментом затяжки.

При монтаже опоры в полевых условиях момент затяжки талрепов регулируется таким образом, чтобы исключить провисание ветровых связей опоры. В связи с этим в практике эксплуатации встречается достаточно широкий разброс фактически реализованных усилий тяжения. Дополнительно стоит обратить внимание на тот факт, что наличие деформации отдельных элементов может оказывать существенное влияние на несущую способность всей механической системы в целом [2].



Рис.2 – Талреп ПТР 30-1

В реальности встречаются случаи нарушения целостности как отдельных элементов ветровых связей, так и отдельных элементов конструкции талрепа (рис. 3).



Рис.3 – Повреждённый талреп

Одной из причин подобных разрушений может выступать как недостаточное качество изготовления элементов конструкции, так и недостаточно корректно проведенный расчет несущей способности разрушающихся элементов конструкции. Все перечисленные потенциальные причины аварий требуют детального анализа в рамках дальнейшего развития работы по предложенной тематике.

#### Литература

1. Крюков К. П., Новгородцев Б. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 312с.
2. Кожевников А.Н., Бурнышева Т.В. Исследование влияния деформации силовых элементов на несущую способность опоры ВЛ П110-3 // Россия молодая: сб. материалов 13 Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Кемерово, 20-23 апр. 2021 г. - Кемерово : ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», 2021.

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА**

**Е.И. Романенко**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, yevgeny.romanenko@yandex.ru**

**Научный руководитель: Пель А.Н., к.т.н., доцент**

*Разработан алгоритм для определения разрушающей нагрузки с помощью численного метода конечных элементов. Проведено сравнение значений разрушающих нагрузок для пластины с отверстием и комбинированных образцов выполненных из различных материалов. Разрушающие нагрузки получены экспериментальным путем и расчетным с использованием метода конечных элементов.*

*An algorithm has been developed to determine the destructive load using the numerical finite element method. The values of destructive loads for a plate with a hole and combined samples made of various materials are compared. Destructive loads were obtained experimentally and calculated using the finite element method.*

Расчеты на прочность силовых элементов авиационных конструкций ведут по разрушающим нагрузкам. Это требует решение задач в физически нелинейной постановке, с учетом работы материала в области пластических деформаций.

В авиационной промышленности применяются силовые элементы, выполненные из материалов с существенно разными прочностными свойствами. Например, стрингер из материала В95 и обшивка из Д16. Расчет на прочность по разрушающим нагрузкам таких комбинированных конструкций является актуальной проблемой.

Целью работы является разработка методики определения разрушающей нагрузки с использованием стандартных конечно-элементных пакетов.

Диаграммы растяжения.

Расчет на прочность с помощью МКЭ обычно не предполагает вычисления разрушающей нагрузки, так как проводится в пределах упругих деформаций. Определение разрушающей нагрузки подразумевает расчеты в области пластического деформирования материала. В программном пакете ANSYS предусмотрена возможность проведения расчетов в физически нелинейной постановке. Для этого в расчет вводятся аппроксимация диаграммы растяжения конкретного материала.

Поэтому вначале была поставлена задача получить реальные диаграммы растяжения для двух распространенных в практике материалов – алюминиевых сплавов Д16 и В95.

Были изготовлены два типа образцов, цельные образцы и образцы с концентраторами напряжений в виде отверстий. Образцы с отверстием и цельные образцы были изготовлены из одного листа и вырезаны в одном направлении. Это исключало погрешности эксперимента, связанные с разбросом механических характеристик материалов.

Цельные образцы были испытаны на растяжение до разрушения с целью получения диаграмм разрушения. Диаграммы растяжения показаны на рисунке 1.

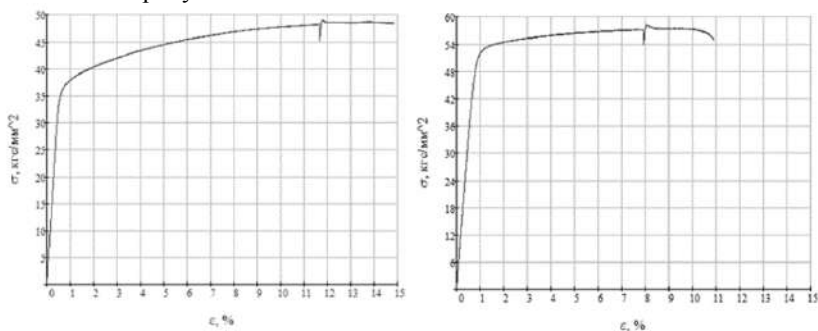


Рис.1 – Диаграмма растяжения материала Д16(слева) и В95(справа)

Сравнение разрушающей нагрузки для пластины с отверстием, полученной экспериментальным и расчетным путем.

На рисунке 2 показаны характерные размеры пластины с отверстием. В таблице 1 приведены геометрические размеры натуральных образцов.

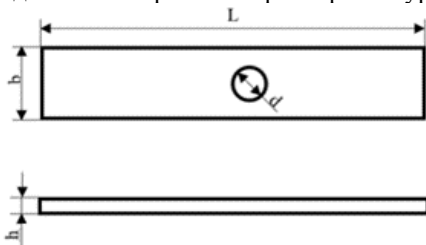


Рис.2 – Характерные размеры образцов

**Таблица 1. Геометрические размеры пластин с отверстием**

Материал	L, мм	b, мм	h, мм	d, мм
Д16	90	30.2	2.8	4
Д16	90	30.2	2.8	8
В95	90	40.3	3.8	5
В95	90	40.3	3.8	10

Экспериментальные разрушающие нагрузки для пластины с отверстием были получены после проведения испытаний на разрывной машине. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Затем разрушающая нагрузка была определена расчетным путем с помощью конечно-элементного пакета. Для этого полученные экспериментально диаграммы растяжения гладких образцов были внесены в конечно-элементный пакет ANSYS mechanical APDL.

Для определения разрушающей нагрузки использовался следующий алгоритм. Перемещение правой грани образца поэтапно увеличивалось и на каждом этапе нагружения определялась реакция в заделке. Эта реакция постепенно сходилась к определенному значению. Максимальное значение принималось за разрушающую нагрузку (таблица 2).

В таблице 2 приведены полученные разрушающие нагрузки для пластины с отверстием и проведено их сравнение.

Сравнение разрушающей нагрузки, полученной экспериментальным и расчетным путем, для комбинированных образцов.

Далее этот алгоритм был применен к комбинированным образцам при совместном нагружении. Были рассмотрены два типа образцов:

Первый - пластина из материала В95 с диаметром отверстия 5 мм совместно работающая с пластиной из материала Д16 с диаметром отверстия 4 мм.

**Таблица 2 – Разрушающие нагрузки для пластин с отверстием**

Материал	d,	$R_{\text{экспериментальная}}, Н$	$R_{\text{численная}}, Н$	Разница, %
Д16 (5 штук)	4	34700	34950	0.7
Д16 (5 штук)	8	29500	29660	0.5
В95 (5 штук)	5	76400	76474	0.1
В95 (5 штук)	10	65370	65549	0.3

Второй - пластина из материала В95 с диаметром отверстия 10 мм совместно работающая с пластиной из материала Д16 с диаметром отверстия 4 мм. В таблице 3 представлены геометрические размеры образцов

**Таблица 3 – Геометрические размеры комбинированных образцов**

Тип образца	Материал	L, мм	b, мм	h, мм	d, мм
1	В95	90	40.3	3.8	5
	Д16	90	30.2	2.9	4
2	В95	90	40.3	3.8	10
	Д16	90	30.2	2.9	4

С помощью разрывной машины были проведены эксперименты на растяжение до разрушения и определены значения разрушающей нагрузки для комбинированных образцов (таблица 4).

Затем расчетная разрушающая нагрузка была определена с помощью конечно-элементного пакета ANSYS mechanical APDL. Смоделированная твердотельная трехмерная модель четверти образца, состоящая из двух пластин, была разбита на конечные элементы. Использовались объемные элементы SOLID45. Модель была закреплена с соблюдением условий симметрии.

Для определения разрушающей нагрузки использовался тот же алгоритм сходимости возникающей реакции в заделке, что и для пластины с отверстием.

В таблице 4 проведено сравнение значений разрушающих нагрузок, полученных экспериментальным и численным путем.

Полученные результаты позволяют говорить, что предложенная методика вычисления разрушающей нагрузки дает хорошее совпадение с экспериментальными значениями.

**Таблица 4 – Разрушающие нагрузки для комбинированных образцов**

Тип образца	Материал	d, мм	$R_{\text{экспериментальная}}$ , Н	$R_{\text{расчетная}}$ , Н	Разница, %
1	B95	5	108600	111563	2.72
	Д16	4			
2	B95	10	97580	100215	2.41
	Д16	4			

Литература

1. Стригунов В.М. Расчет самолета на прочность: Учебник для авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с., ил.
2. Гост 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение – ВЗАМЕН ГОСТ 1497-73 : Москва, 2005.
3. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя / К.А. Басов. – : Профобразование, 2019 - 2-е издание. – 640 с.

**ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Ю.С. Селиванов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, u.s.selivanov@mail.ru**

**Научный руководитель: Матвеев К.А., д.т.н., профессор**

*На основе реальной детали была получена топологически оптимизированная деталь с учетом заданной конфигурации закреплений и нагрузки, а также ограничений по массе с помощью конечно-элементного пакета Femap. Произведен последующий проверочный статический расчет на прочность оптимизированной конструкции в конечно-элементном пакете Ansys Workbench.*

*Based on the real part, a topologically optimized part was obtained, taking into account the given configuration of fasteners and loads, as well as mass constraints, using the finite element package Femap. A subsequent static strength verification calculation of the optimized structure was performed in the finite element Ansys Workbench software.*

Топологическая оптимизация является одним из видов оптимизации. Ее целью является найти оптимальное распределение материала в конструкции при заданной конфигурации нагрузок и граничных

условий. На данный момент существует несколько методов топологической оптимизации, реализованных в популярных конечно-элементных пакетах. Первый - это метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), метод штрафных функций для изотропного твердого тела. Второй метод – ESO (Evolutionary Structural Optimization), метод однонаправленной эволюционной оптимизации. Следующий метод – это метод BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization), метод двунаправленной эволюционной оптимизации. Эти методы реализованы в конечно-элементных пакетах и активно используются и конкурируют между собой. Чаще всего в пакетах используется реализация методов SIMP и BESO, которые работают в совокупности.

Была поставлена задача по оптимизации топологии кронштейна. Кронштейн прикреплен к шпангоуту с помощью 8 болтов различного диаметра. Нагрузка приложена по оси тяги. Нагрузкой является растяжение по оси тяги усилием 1541 кгс. Схема расположения и крепления кронштейна к шпангоуту показана на рисунке 1. Для выполнения данной задачи использовался конечно-элементный пакет Femap. В данном пакете реализованы все вышеописанные методы.

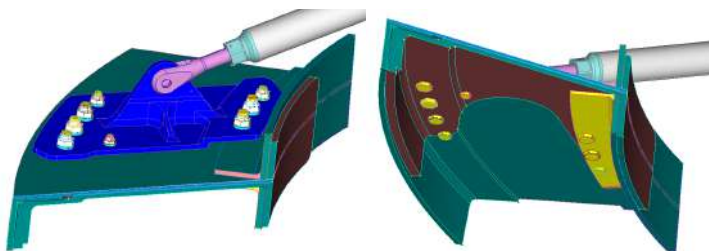


Рис.1 – Расположение кронштейна

На рисунке 2 показана модель исходного и модель увеличенного кронштейна. Модель была искусственно увеличена для увеличения области проектирования.

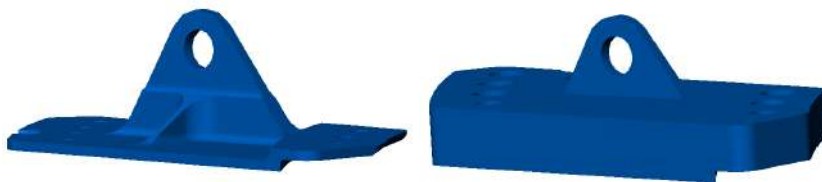


Рис.2 – Исходная и увеличенная модель кронштейна



Кронштейн изготовлен из стали 30ХГСА. Вес исходного кронштейна составляет 823 грамма, вес увеличенной модели составил ~3,5 килограмма. В качестве ограничений были приняты ограничение на массу проектируемой области до 10% от массы увеличенной модели. Детали прикреплены к шпангоуту 8-ю болтами (рисунок 1). Нагрузка приложена в большой отдельно стоящей проушине по направлению предполагаемой тяги. Нагрузка равна 1541 кгс, она распределена по всей поверхности проушины. Граничные условия и нагрузка показаны на рисунке 3.

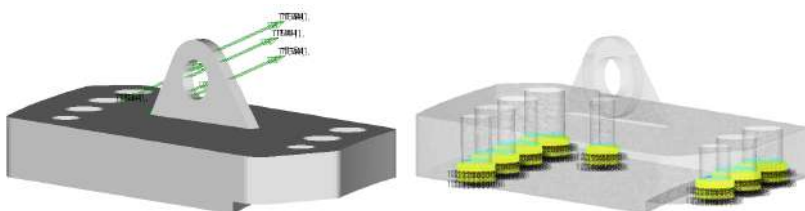


Рис.3 – Граничные условия и нагрузка

После оптимизации и обработки геометрии была получена следующая конструкция, показанная на рисунке 4.

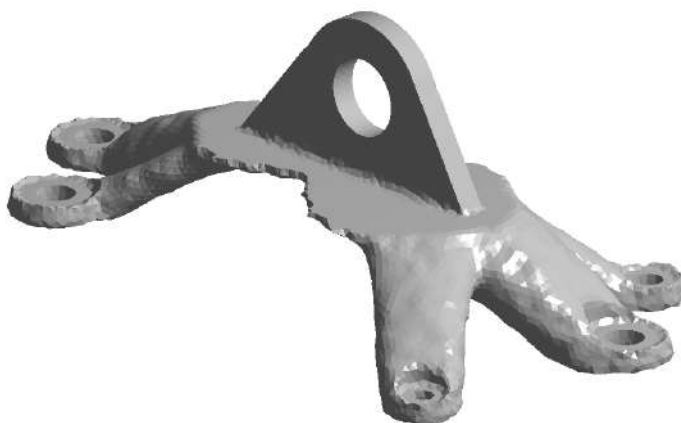


Рис.4 – Оптимизированный кронштейн

Результирующая масса кронштейна ~346 грамм, что на 58% меньше веса исходной детали. В ходе оптимизации были удалены 2 из 8 крепежных отверстий в следствие того, что данные части детали не

обладали существенными напряжениями. Весь последующий анализ НДС оптимизированной модели проводился в пакете Ansys Workbench и показал, что относительно исходного кронштейна, оптимизированный имеет более равномерное напряженное состояние, исчезли явные концентрации напряжений. На рисунке 5 слева показано НДС исходного кронштейна, справа оптимизированного, напряжения представлены в МПа. При переводе в МКГСС значение максимума равно 77,35 кгс/мм<sup>2</sup>, что не превышает допустимого предела.

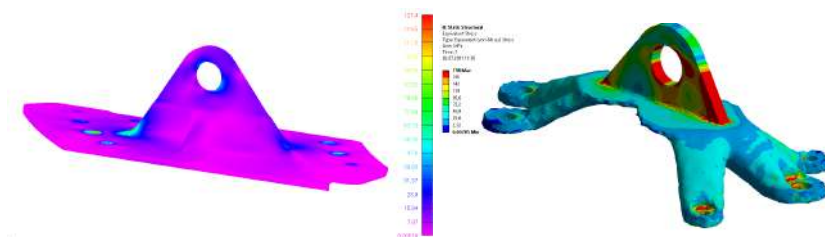


Рис.5 – НДС исходного кронштейна (слева), кгс/мм<sup>2</sup> и оптимизированного (справа), МПа

На основе данной модели была изготовлена физическая деталь с помощью аддитивных технологий из пластика, рисунок 6.



Рис.6 – Деталь, изготовленная на основе оптимизированной модели

В будущем планируется изготовить исходную деталь из аналогичного материала для проведения испытаний и дальнейшего анализа.

Литература:

1. Бионический дизайн / А.И. Боровков [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. -92 с.

2. Аддитивные технологии: учеб. Пособие / А.И. Рудской [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 252 с.

3. Троицкий В.А. Оптимизация формы упругих тел / В. А. Троицкий, Л. В. Петухов. — М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1982. — 432 с.

4. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 784 с.: ил.

5. Прокопов, В. С. Преимущества использования метода топологической оптимизации на этапе проектирования промышленного продукта / В. С. Прокопов, Д. С. Вдовин, С. С. Хрыков // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. Труды XVII международной научно-практической конференции. — 2017. — С. 26—29

## **ПНЕВМОГИДРОАККУМУЛЯТОРЫ И СОВРЕМЕННЫЙ ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

**М.А. Толстов**

**Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, [namaslov@mail.ru](mailto:namaslov@mail.ru)**

**Научный руководитель: Маслов Н.А., к.т.н., доцент**

*В работе рассмотрено устройство, принцип действия и функции пневмогидроаккумуляторов в гидравлических системах горных, подъемно-транспортных, путевых, строительных и дорожных машинах, рассмотрены примеры применения, выполнен сравнительный анализ и классификация функций пневмогидроаккумуляторов по физическим принципам их применения.*

*The paper considers the device, principle of operation and functions of pneumatic accumulators in hydraulic systems of mining, lifting and transport, track, construction and transport machines, considers examples of application, a comparative analysis and classification of the functions of pneumatic accumulators according to the physical principles of their application are made.*

Для обоснования применения пневмогидроаккумуляторов (далее - ПГА) в гидроприводах современных горных, подъемно-транспортных, путевых, строительных и дорожных машин (далее – машин) необходимо методическое и материально обеспечение.

Задачи работы: выполнить анализ конструкций ПГА; обобщить современный опыт применения ПГА в мобильных машинах, включая путевые машины; выявить физические принципы применения ПГА; разработать классификацию функций ПГА по физическим принципам применения ПГА.

Гидроаккумулятор (далее - АК) - устройство для накопления объема гидравлического масла под давлением. Принцип его действия основан на том, что гидравлическое масло (далее - масло) в АК подвергается воздействию сжатого газа, весовой нагрузки или пружины.

ПГА - самый распространённый в мобильных машинах тип АК. В нем накопление энергии осуществляется сжатием инертного газа (чаще всего азота) [1]. По типу разделителя рабочих сред (газа и масла) ПГА бывают баллонными, мембранными и поршневыми.

Функции АК в гидроприводах машин: амортизация ударов и вибраций; повышение быстродействия привода рабочего или ходового оборудования; предотвращение последствий аварийных ситуаций; гидравлическая амортизация; компенсация снижения сил на рабочих органах.

Амортизация вредоносных ударов и вибраций в гидроприводе осуществляется подключением ПГА к напорной линии гидросистемы [2]. Это, например, реализовано во фронтальных погрузчиках, где ПГА подключён к напорной линии гидроцилиндров подъёма стрелы. При движении погрузчика и колебаниях его стрелы уровень масла в ПГА изменяется. Благодаря этому энергия колебаний расходуется на преодоление сил сопротивления движению масла в рабочих гидролиниях между гидроцилиндрами и гидрораспределителем стрелы. В данном случае физический принцип амортизации ударов и вибраций в гидроприводе основан на законе сохранения энергии, то есть аккумуляции кинетической (скоростного давления потока  $p_{ск}$ ) и (или) потенциальной (гидростатического давления потока  $p_{ст}$ ) энергии масла [1]:

$$p = p_{ст} + p_{ск} = p_{ст} + \rho v^2 / 2, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность масла;  $v$  - скорость потока масла;  $p$  - полное давление масла.

При помощи ПГА можно повысить скорость выходного звена гидродвигателя без применения более производительного насоса и более мощного первичного двигателя машины. Например, в гидроприводе подъёма-опускания подбивочного блока выправочно-подбивочно-рихтовочной машины требуется большая скорость опускания подбивочных блоков (около 1 м/с). Операция кратковременная, поэтому применение более производительного насоса и более мощного двигателя его привода не целесообразно. Задачу решают применением насосно-аккумуляторного питания гидроцилиндра при опускании подбивочного блока. В остальное время ПГА заряжается. Известны зависимости (2) и (4) для расчета скорости выходного звена гидродвигателя поступательного и вращательного действия.

Скорость штока гидроцилиндра [1]:

$$v_{ц} = \frac{Q_{вх}}{A_{п}} \cdot \eta_{ц0}, \quad (2)$$

где  $\eta_{ц0}$  - объёмный КПД гидроцилиндра;  $A_{п}$  - площадь поршня гидроцилиндра;  $Q_{вх}$  - объёмный расход масла в напорной линии:

$$Q_{вх} = \frac{V}{t}, \quad (3)$$

где  $V$  - объём масла, проходящий через поперечное сечение напорной линии;  $t$  - период времени, за который измерялся прошедший объём.

Частота вращения вала гидромотора [1]:

$$n_{м} = \frac{Q_{вх}}{q_{м}} \cdot \eta_{м0}, \quad (4)$$

где  $\eta_{м0}$  - объёмный КПД гидромотора;  $q_{м}$  - рабочий объём гидромотора.

С использованием зависимостей (1)-(4) установлено, что физический принцип повышения быстродействия гидропривода основан на ликвидации пневмогидроаккумулятором возникающего дефицита расхода масла, от которого, согласно рассмотренным уравнениям, напрямую зависит скорость выходного звена гидродвигателя (штока гидроцилиндра или частота вращения вала гидромотора).

В аварийных ситуациях, например, при отключении гидропривода, имеющаяся в ПГА энергия может позволить безопасно завершить рабочую операцию или переместить рабочее оборудование машины на опускание. Например, при аварийном отключении насоса масло, запасённое под давлением в ПГА, не позволит штоку гидроцилиндра

самопроизвольно переместиться вниз [3]. При установлении физического принципа, реализованного в рассмотренном способе предотвращения аварийной остановки гидродвигателя, применен закон Паскаля, согласно которому сила на штоке гидроцилиндра при выдвигении определяется следующим уравнением [1]:

$$F_{шт}^{выдв} = (F_{п} - F_{шт}) \cdot \eta_{цгм} = (p_{п} \cdot A_{п} - p_{шт} \cdot A_{шт}) \cdot \eta_{цгм}, \quad (5)$$

где  $F_{п}$  и  $F_{шт}$  силы, действующие на поршень со стороны поршневой и штоковой полостей;  $\eta_{цгм}$  - гидромеханический КПД гидроцилиндра;  $p_{п}$  и  $p_{шт}$  - давления в поршневой и штоковой полостях;  $A_{п}$  и  $A_{шт}$  - рабочие площади поршня и штока.

Сделан вывод о том, что физический принцип предотвращения аварийной ситуации при остановке гидропривода может быть основан на поддержании пневмогидроаккумулятором необходимого давления в рабочей линии гидродвигателя и необходимой силы на его выходном звене при неработающем насосе.

ПГА могут применяться для демпфирования механических ударов и колебаний в различных механизмах. Тогда сжимаемый в ПГА газ используется в качестве пружинящего элемента [3]. Например, принцип действия гидропневматической подвески автомобиля основан на том, что энергия механических колебаний через масло передаётся из амортизатора подвески объёму газа в ПГА, который выполняет функцию пружины. При этом колебания гасятся путем дросселирования масла. Физический принцип гидравлической амортизации основан на законе Бойля-Мариотта (6), который описывает состояние объёма газа до и после изменения при адиабатном процессе без взаимодействия с окружающей средой (так как процесс происходит слишком быстро) и соответственно сжатие и возвращение объёма газа в данном процессе [3]:

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k, \quad (6)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  - давление в объёме газа до и после изменения;  $V_1$  и  $V_2$  - объём газа до и после изменения;  $k$  - показатель адиабаты.

ПГА можно применить для компенсации падения силы на рабочем органе машины, который длительно находится в выключенном состоянии. Реализована эта идея, например, в приводе горизонтального поджатия опорных роликов виброблока динамического стабилизатора пути к головке рельса. При чрезмерной разрядке ПГА и падении давления в поршневой полости гидроцилиндра горизонтального

поджатия опорных роликов срабатывает реле давления, затем переключается распределитель и происходит подзарядка жидкостной полости ПГА из напорной линии насоса. Так осуществляется горизонтальное поджатия опорных роликов виброблока динамического стабилизатора пути к головке рельса практически постоянной силой и компенсируется износ роликов при их взаимодействии с головкой рельса. При установлении физического принципа, реализованного в рассмотренном способе компенсации снижения силы на рабочем органе машины, применен закон Паскаля (5). Сделан вывод о том, что физический принцип компенсации снижения силы на рабочем органе машины основан на поддержании пневмогидроаккумулятором необходимого давления в рабочей полости гидроцилиндра, путем компенсации внутренних перетечек в гидроцилиндре за счёт аккумулированного под давлением объема масла.

**Таблица 1 – Классификация функций пневмогидроаккумуляторов по физическим принципам применения**

Функция ПГА	Основа физического принципа применения ПГА
Повышение быстродействия	Зависимости для расчета скорости выходного звена гидродвигателя
Предотвращение последствий аварийных ситуаций	Закон Паскаля
Компенсация снижения сил	
Амортизация ударов и вибраций	Закон сохранения энергии
Гидравлическая амортизация	Закон Бойля – Мариотта

По результатам проведенного в работе сравнительного анализа функций ПГА в гидроприводах машин предложена классификация функций ПГА по физическим принципам применения ПГА (Таблица 1).

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации 121052600390-5.

Литература:

1. Мокин Н. В. Гидравлические и пневматические приводы : учеб. пособие / Сиб. гос. ун-т путей сообщ. - Новосибирск : СГУПС, 2012. - 173 с.
2. Sheaf R. Banging Damages Pipes and Fittings // Fluid Power Journal. – 2020. - № 9. – URL: <https://fluidpowerjournal.com/banging-damages-pipes-and-fittings/> (дата обращения: 02.11.2020).

3. Гидропривод. Основы и компоненты. Учебный курс по гидравлике, том 1 / Х. Экснер, Р. Фрейтаг, Д-р Х. Гайс, Р. Ланг, Й. Оппольцер, П. Шваб, Е. Зумпф, У. Остендорфф, М. Райк. М., 2003. 322 с.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ**

**В.М. Томшин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, wiktom@mail.ru**

**Научный руководитель: Пель А.Н., к.т.н., доцент**

*В статье представлены возможные способы экспериментального определения механических характеристик композитных труб. В отличие от существующих методов расчета металлических труб, базирующихся на методах сопротивления материалов, для анализа деформирования и прочности композитных труб необходимо привлечение теории упругости анизотропного тела и значительного объема экспериментальных данных. Основные механические характеристики материала, необходимые для оценки прочности и деформаций композитных труб, получают из стандартных статических механических испытаний. В данной статье представлены испытания на растяжение образцов.*

*The article presents possible methods of experimental determination of the mechanical characteristics of composite pipes. In contrast to the existing methods of calculating metal pipes based on the methods of material resistance, the analysis of the deformation and strength of composite pipes requires the use of the theory of elasticity of an anisotropic body and a significant amount of experimental data. The main mechanical characteristics of the material required to evaluate the strength and deformations of composite pipes are obtained from standard static mechanical tests. This article presents the tensile tests of the samples.*

В целях повышения технологичности, сбережения энергии, увеличения срока службы все больше получают распространение замена металлических труб на композитные аналоги. Они обладают очень высокой коррозионной стойкостью, сопоставимой со стойкостью нержавеющей стали.

В промышленности стеклопластиковые и углепластиковые изделия используют в основном в тех областях, где требуются очень легкие, прочные либо стойкие к коррозии материалы.

Прогнозирование ресурса и оптимизация состава указанных изделий предполагает разработку специальных методов испытаний, а также



уточненных моделей и расчетных методов, учитывающих особенности деформирования и разрушения композитов [1].

В отличие от существующих методов расчета металлических труб, базирующихся на методах сопротивления материалов, для анализа деформирования и прочности композитных труб необходимо привлечение теории упругости анизотропного тела и значительного объема экспериментальных данных. Основные механические характеристики материала, необходимые для оценки прочности и деформаций композитных труб, получают из стандартных статических механических испытаний.

Испытания образцов на растяжение проводятся с целью экспериментального определения механических характеристик материалов. Наиболее распространенными в настоящее время являются испытания цилиндрических и плоских образцов в условиях одноосного растяжения [2].

Таким образом, испытания на растяжение дают возможность определить самые важные механические параметры материала необходимые для создания прочных и надежных конструкций.

В качестве примера композитной трубы будем рассматривать трубу из углепластика. Для проведения испытаний использовалась испытательная машина Instron.

Для определения механических характеристик в осевом направлении были вырезаны плоские образцы в виде пластинок и проведен ряд испытаний на растяжение. Пример испытания плоского образца представлен на рис.1.

При определении механических характеристик в осевом направлении образцы представляют из себя кольцевые заготовки. Для определения механических характеристик в окружном направлении используется следующий способ. Он заключается в растяжении кольцевых образцов из композитного материала двумя полудисками. Испытания проводились также на машине Instron. На рис.2 представлен кольцевой образец при испытании.

При растяжении образцов определяется диаграмма деформирования, то есть зависимость напряжения от деформации. Полученные диаграммы зависимостей напряжений от деформаций для плоских и кольцевых образцов представлены на рис.3 и рис.4 соответственно.

Получившиеся результаты эксперимента: максимальные значения нагрузки и напряжения, а также модуль Юнга для каждого из образцов (плоских и кольцевых) представлены в таблице 1 и таблице 2 соответственно.



Рис.1 – Испытание плоского образца



Рис.2 – Испытание кольцевого образца

Образцы с 1 по 6 Кривая по навесн датч

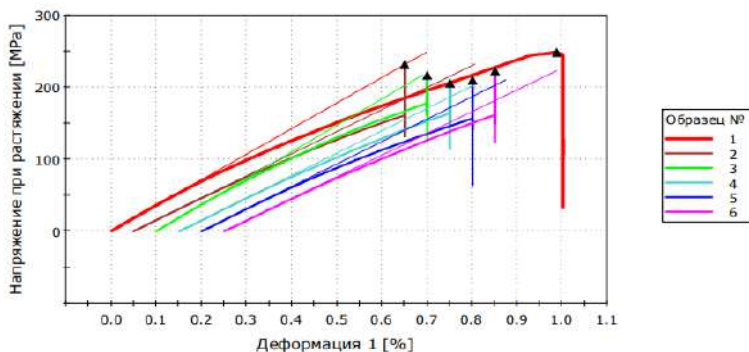


Рис.3 – Полученные диаграммы зависимостей для плоских образцов

Образцы с 1 по 8 Кривая по навесн датч

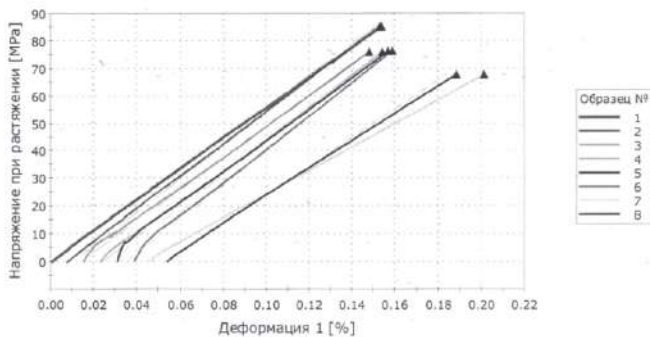


Рис.4 – Полученные диаграммы зависимостей для кольцевых образцов

Следует отметить, что при растяжении полудисками кольцевого образца в нагружении участвует сразу два диаметрально противоположных сечения. Поэтому, сила, которая приложена к тяге делится пополам на каждое сечение. А значит, что и полученные напряжения и модули упругости, представленные в таблице 2, тоже требуется разделить пополам.

**Таблица 1 – Результаты эксперимента для плоских образцов**

	Макс нагрузка (N)	Напряжение при растяжении (МПа)	Модуль Юнга (МПа)
1	8829.8779	248.5049	35484.8861
2	7029.6206	231.9777	30645.2517
3	8285.9043	216.8568	36624.9480
4	7350.2593	205.9462	31123.2219
5	6791.8765	210.1135	31154.5183
6	7054.5630	222.9127	30245.9318
Среднее	7557.0169	222.7186	32546.4596
Стандартное отклонение	813.6642	15.6542	2761.8307

**Таблица 2 – Результаты эксперимента для кольцевых образцов**

	Макс нагрузка (N)	Напряжение при растяжении (МПа)	Модуль Юнга (МПа)	Толщина (мм)	Ширина (мм)
1	4000.0935	85.2262	56676.2868	2.1	22.35
2	4000.1516	85.2227	60380.5630	2.1	22.35
3	4000.0732	76.0470	56989.0555	2	26.30
4	4000.1213	76.0479	60051.8239	2	26.30
5	4000.1477	76.3387	57370.7108	2	26.20
6	4000.0786	76.3374	61742.2661	2	26.20
7	4000.0173	67.8429	42899.5019	2.2	26.80
8	4000.1123	67.8445	51665.7455	2.2	26.80
Среднее	4000.0995	76.3641	55971.9942	2.075	25.41
Стандартное отклонение	0.04407	6.5736	6121.3585	0.088	1.906

Полученные экспериментальные данные имеют разброс. Это объясняется тем, что композитные трубы изготовлены путем намотки углеродных нитей, и разные образцы имеют разную, существенно отличающуюся плотность намотки, но в целом, для композитного материалы полученные результаты являются приемлемыми.

Литература:

1. Кухарев Л.П., Можаровский В.В. Инженерная методика расчета и определения механических характеристик труб, 2009.
2. Кузнецова Е.В. Экспериментальная механика. Учебно-методическое пособие. Пермь. Россия. 2009.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ ТОНКОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ**

**Д.Р. Шелевая**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, krasnorutskiy@corp.nstu.ru**

**Научный руководитель: Красноруцкий Д.А., к.т.н., доцент**

*В статье рассматривается проблема описания демпфирования, обусловленного внутренним трением в материале при динамическом изгибе по дифференциальной модели тонкого упругого стержня. В качестве механизма рассеивания энергии принята модель гистерезисных потерь. Разработан алгоритм расчета. Декремент колебаний задается в виде полинома амплитуды напряжений для материала и не зависит от частоты колебаний, длины стержня и формы его поперечного сечения.*

*The paper is about the problem of simulating the damping caused by internal friction in the material during dynamic bending according to the differential model of a thin elastic rod. The hysteresis loss model has been adopted as an energy dissipation mechanism. A calculation algorithm has been developed. The oscillation decrement is given as a polynomial of the stress amplitude for the material and does not depend on the oscillation frequency, the length of the rod and the shape of its cross-section.*

Проблема математического описания внутренних потерь энергии при динамическом деформировании материалов изучается более 150-ти лет [1]. Было предложено множество моделей [1-4], которые в той или иной степени описывали наблюдаемые в экспериментах эффекты диссипации энергии за счет внутренних свойств материалов. Основной проблемой предлагаемых методов является пропорциональность между

универсальностью и сложностью их применения на практике. Внутреннее трение обычно описывают вязкоупругой моделью, в которой сила трения пропорциональна скорости. Такие модели просты в применении, но обладают рядом ограничений в описании наблюдаемых на практике явлений [1]. Недостатком вязкоупругих моделей является зависимость сил трения от частоты колебаний. Применение такого подхода для описания деформирования тонкого упругого стержня по дифференциальной модели [5] приводит к проблеме вариативности исходных данных в зависимости от рассматриваемого режима колебаний (формы и частоты), длины стержня, размера и формы его поперечного сечения. Целью данной работы является создание такого подхода, в котором характеристики потерь задаются для материала в виде зависимости декремента от амплитуды колебаний и реализуются при колебаниях стержней вне зависимости от их длины, формы поперечных сечений и режима колебаний. Обзор методов описания внутренних потерь и история их появления представлены в диссертации [1]. Интересный способ учета потерь при малых колебаниях предложен в работе [3]. В данной статье предлагается алгоритм учета диссипации энергии при динамическом изгибе стержней на основе гистерезисных потерь [2].

Введем гипотезу зависимости силы трения, возникающей на элементарной площадке материала, следующим образом:

$$dP = (c_0 + c_1 |\sigma| + c_2 \sigma^2) \varepsilon dF, \quad (1)$$

где  $c_i$  – константы материала,  $dF$  – элементарная площадь,  $\sigma = E\varepsilon$  – действующее напряжение,  $\varepsilon$  – деформация,  $E$  – модуль Юнга. Рассмотрим модель тонкого упругого стержня [5], в рамках гипотезы плоских сечений, при чистом изгибе деформации растяжения-сжатия элементарной площадки, находящейся на расстоянии  $y$  от нейтральной оси, можно выразить через изменение кривизны элементарного участка:

$$\varepsilon = y \cdot \Delta k, \quad (2)$$

где  $\Delta k$  – изменение кривизны,  $|y|$  – координата элементарной площадки относительно нейтральной оси стержня. Тогда момент трения всего сечения при чистом изгибе запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
M_{TP} &= \int_F y dP = \int_F y (c_0 + c_1 |\sigma| + c_2 \sigma^2) \varepsilon dF = \\
&= \int_F y \left[ c_0 + c_1 |E y \Delta k| + c_2 (E y \Delta k)^2 \right] y \Delta k dF = \\
&= \left[ c_0 \int_F y^2 dF + c_1 \Delta k E \int_F |y|^3 dF + c_2 E^2 \Delta k^2 \int_F y^4 dF \right] \Delta k,
\end{aligned} \tag{3}$$

Введем обозначения для интегралов в (3), тогда момент трения запишется следующим образом:

$$M_{TP} = \left[ c_0 J + c_1 \Delta k E T + c_2 E^2 H \Delta k^2 \right] \Delta k, \tag{4}$$

где  $J$  – момент инерции поперечного сечения,  $T$  и  $H$  – моменты площади 3-й и 4-й степени соответственно.

Соотношение упругости [5] при изгибе тонкого стержня:  $\Delta k = \frac{M}{EJ}$ ,

где  $M$  – внутренний момент,  $EJ$  – изгибная жесткость.

Рассмотрим два близких дискретных момента времени, опишем изменение кривизны при переходе между ними. Пусть в первый момент времени достигнута кривизна  $\Delta k_0$ , при этом внутренний момент равен  $M_0$ . Пусть при переходе в новое состояние  $(\Delta k, M)$  возникает и действует момент трения (4), направленный против изменения внутреннего момента, что может быть выражено следующим образом:

$$\Delta k - \Delta k_0 = \frac{M - M_0 - \text{sign}(M - M_0) \text{sign}(M) M_{TP}}{EJ}. \tag{5}$$

В силу малости приращения времени, положим, что в моменте трения (4), величина в квадратных скобках определяется кривизной в первом моменте времени и постоянна на приращении, тогда, разрешив (5) относительно новой кривизны, получим

$$\Delta k = \frac{M - M_0 + \Delta k_0 EJ - \Delta k_0 \lambda D}{EJ - \lambda D}, \tag{6}$$

где  $D = [c_0 J + c_1 \Delta k_0 E T + c_2 E^2 H \Delta k_0^2]$ ,  $\lambda = \text{sign}(M - M_0) \text{sign}(M)$ .

Если принять, что  $D = \delta \cdot EJ / 2$ , тогда по формуле (6) для симметричного отнулевого изменения момента при разных  $\delta$  получим петли гистерезиса, изображенные на рис.1.

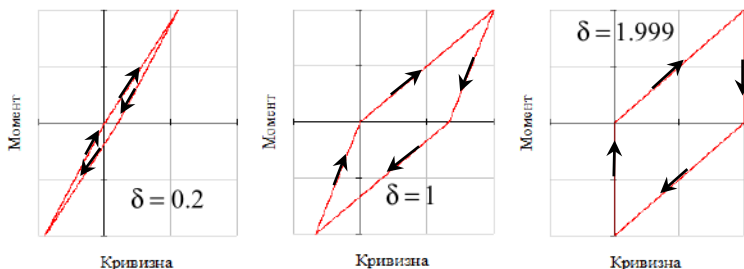


Рис.1 – Петли гистерезиса для разных  $\delta$

При этом величина  $\delta$  является логарифмическим декрементом колебаний, он характеризует величину диссипации энергии за цикл:

$\delta = \frac{1}{2} \frac{W_{TP}}{W}$ , где  $W_{TP}$  – убыль энергии за один период колебаний (работа

момента потерь  $M_{TP}$ ),  $W$  – полная энергия системы в начальный момент времени. В общем случае декремент колебаний будет зависеть от амплитуды напряжений (достигнутой кривизны).

Использование формулы (6) напрямую для расчетов динамического деформирования стержней невозможно по двум причинам. Во-первых, при переходе момента через нуль происходит излом траектории, что приводит к плохой сходимости при решении нелинейной краевой задачи для системы дифференциальных уравнений стержня [5]. Во-вторых, такая модель накапливает остаточные деформации (кривизны), если цикл несимметричный (рис.2).

Для решения этих проблем предлагается следующий алгоритм. Введем амплитудные значения момента, при изменении направления нагружения, а именно будем хранить величину момента  $M_{\max}$ , если знак величины  $\Delta M = (M - M_0)$  меняется с положительного на отрицательный, и величину момента  $M_{\min}$  если знак  $\Delta M$  меняется с отрицательного на положительный. В начальный момент времени можно положить  $M_{\max} = M_{\min} = 0$ . Для вычисления кривизны,

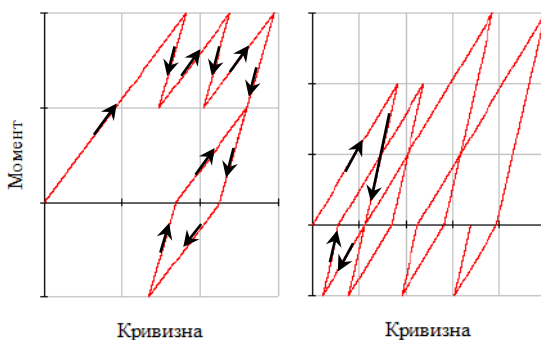


Рис.2 – Примеры накопления остаточных деформаций (кривизны) при несимметричном цикле

достигнутой при действии момента  $M$  выполняем следующие действия:

1.  $\Delta M = (M - M_0)$ ,  $\lambda = \text{sign}(\Delta M)$ .
2. Запоминаем знак изменения момента  $\lambda_0 = \lambda$ , если  $\lambda_0 = 0$ .
3. Если  $(\Delta M \cdot \lambda_0) < 0$  (смена знака нагружения), тогда
  - 3.1 если  $\Delta M > 0$ , тогда  $M_{\min} = M$ ,  $\lambda_0 = 1$ ;
  - 3.2 иначе  $M_{\max} = M$ ,  $\lambda_0 = -1$ .
4.  $m_0 = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2}$ ,  $\lambda = \lambda \cdot \text{sign}(M - m_0)$ ,  $k = 1$ ,  $m_A = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2}$ .
5. Если  $m_A \neq 0$ , тогда  $k = \min\left(1, \left|\frac{M - m_0}{m_A}\right| \cdot \kappa\right)$ , где  $\kappa \in [1, \infty)$ .
6. Вычисляем кривизну:  $\Delta k = \frac{M - M_0 + \Delta k_0 EJ - \Delta k_0 \lambda k D}{EJ - \lambda k D}$ .

Здесь коэффициент  $\kappa$  выбирается произвольно, он отвечает за сглаживание излома при переходе момента через среднее значение момента цикла  $m_0$ . При увеличении значения  $\kappa$  изломы стремятся к случаю без сглаживания, изображенным на рис.1-2. На рисунке 3 представлены петли гистерезиса, рассчитанные по предложенному алгоритму при разных параметрах сглаживания  $\kappa$ . Из рисунков видно, что при симметричном нагружении диаграмма деформирования выходит на симметричную петлю гистерезиса относительно нуля.



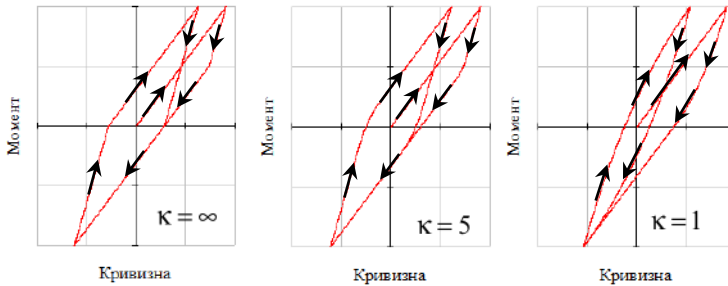


Рис.3 – Выход на симметричный цикл при разных параметрах сглаживания  $\kappa$

На рис.4 представлены петли гистерезиса ( $\kappa = 10$ ), рассчитанные по предложенному алгоритму для циклов изменения моментов, приведенных на рис.2. Из рисунка видно, что безмерного накопления остаточной кривизны (деформации) при несимметричном нагружении не происходит.

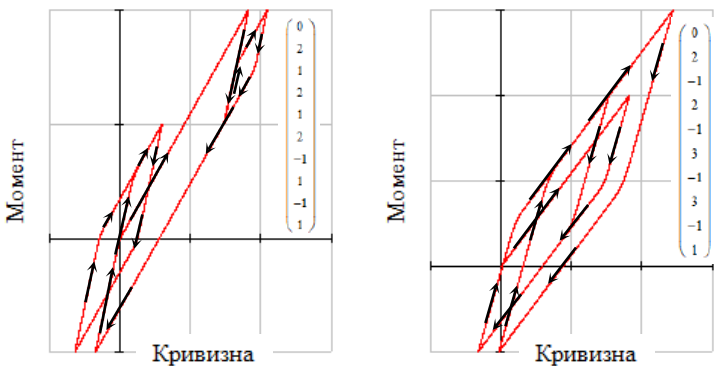


Рис.4 – Примеры петель гистерезиса

Предварительные тестовые расчеты с использованием предложенного алгоритма показали работоспособность на модели тонкого упругого стержня [5], задаваемый постоянный декремент колебаний реализуется при расчете затухающих нелинейных колебаний после начального возбуждения и не зависит от длины, частоты колебаний, формы поперечного сечения. Требуется дальнейшее всестороннее тестирование, в том числе случай, когда декремент зависит от амплитуды колебаний, что заложено в исходную гипотезу по формуле (1).

#### Литература:

1. Шепитько Е.С. Модель нелокального демпфирования материала при расчете стержневых элементов: диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.17 /Шепитько Елена Сергеевна; [Место защиты: ФГАОУ ВО Российский университет транспорта]. – Москва, 2019. – 119 с.
2. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
3. Гоздек В.С., О модели материала с внутренним трением // Ученые записки ЦАГИ, 1982. – Том XIII, №2. – С.142-146.
4. Бабаков, И.М. Теория колебаний / И.М.Бабаков. – М.: Наука, 1965. – 560 с.
5. Красноруцкий Д. А. Методика расчета механики систем связанных тонких упругих стержней по дифференциальной модели / Д. А. Красноруцкий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика = PNRPU Mechanics Bulletin. - 2016. – № 2. – С. 69– 88. - DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.06

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОВЫХ ТОПОЛОГИЙ КРОНШТЕЙНА В ПАКЕТАХ ПРОГРАММ ANSYS WORKBENCH И FEMAP**

**С.Р. Щедренко**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, onirs@corp.nstu.ru**

**Научный руководитель: Бурнышева Т.В., д.т.н., доцент**

*В настоящее время топологическая оптимизация конструкций находит применение во многих областях. Разработка новых методов и подходов для реализации наиболее легких (но при этом жестких и прочных) конструкций имеет важное значение как в прикладной, так и в теоретической науках. В данной статье сравниваются результаты топологической оптимизации кронштейна, полученные с помощью пакетов ANSYS Workbench и Femap.*

*Currently, topological optimization of structures has applications in many fields. The development of new methods and approaches to implement the lightest (yet stiff and strong) structures is important in both applied and theoretical sciences. In this article, the results of topological optimization of a bracket obtained with the ANSYS Workbench and Femap packages are compared.*

Топологическая оптимизация – это процесс, в результате которого изменяется форма рассматриваемого элемента или объекта путем удаления некоторой области исходной конструкции. Целью данного процесса является максимизация производительности конструкции с учетом внешних сил, граничных условий и ограничений.

#### **Методы топологической оптимизации**

Самым первым методом топологической оптимизации был SIMP (Isotropic Material with Penalization), или метод пенализации для твердого изотропного тела [1]. В SIMP подразумевается, что в области моделирования необходимо размазать условный объект и материал для него в виде промежуточной плотности, и потом постепенно собрать эту плотность в отдельные элементы конструкции.

Основная идея второго метода — по возможности оставлять полезные для данной конструкции области, несущие нагрузку, где есть напряжение, а ненапряженные области удалять. Такая техника довольно просто реализуется и называется методом эволюционной оптимизации конструкции ESO (Evolutionary Structural Optimization) [1].

Также, метод двунаправленной эволюционной оптимизации конструкции BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) позволяет не только удалять, но и добавлять эффективный материал, что позволяет найти более совершенные структуры [1].

#### **Постановка задачи**

Рассматривается кронштейн массой  $m=0,1622$  кг и толщиной  $h= 10$  мм. Нижнее отверстие кронштейна закреплено жестко, а верхнее – с поворотом по оси  $z$ . Материал конструкции – сталь (см. табл. 1).

**Таблица 1 – Физические характеристики материала**

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E$ , Па	Коэффициент Пуассона $\mu$	Предел текучести $[\sigma_T]$ , Па
7850	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	$255 \cdot 10^6$

Необходимо найти оптимальную по массе конструкцию так, чтобы при приложении нагрузок на проушину кронштейна оптимизированная конструкция сохраняла свою жесткость и не превышала предела текучести материала (см. табл. 1).

Решать поставленную задачу будем численно, с помощью конечно-элементных пакетов программ ANSYS и Femap [2-3]. Рассмотрим один случай нагружения. Сила, действующая на проушину вдоль оси  $y$ , равна  $P_y=-4000$  Н.

## Нахождение оптимальной по массе конструкции

Расчеты по решению поставленной выше задачи будем проводить в конечно-элементном пакете ANSYS Workbench. Рассмотрим три расчетных случая, в которых масса оптимизированных моделей составит 60%, 40% и 20% от исходной массы кронштейна соответственно.

На рис. 1 представлена модель кронштейна в модуле ANSYS Mechanical с наложенными на нее ограничениями и нагрузкой.

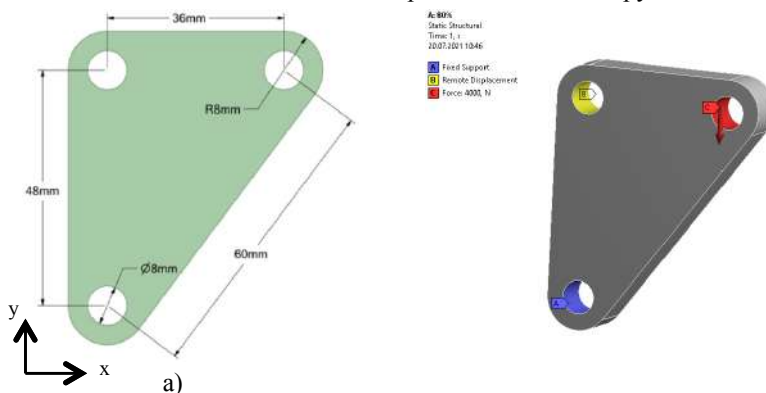


Рис. 1 – исходная модель: а – геометрические параметры; б - задание ограничений и нагрузки в модуле ANSYS Mechanical

Вместе с тем необходимо учитывать, что после численного решения задачи топологической оптимизации поверхность тела не является гладкой, а состоит из граней элементов сетки, оставшихся после оптимизационного расчета.

На рисунке 2 представлены полученные модели, а также их напряженно деформированные состояния. Все полученные данные сведены в табл. 2.

Подходящей оптимизированной конструкцией будет являться та, напряжения в которой наиболее близки к пределу текучести материала  $[\sigma_T] = 255 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Из рис. 2 видно, что напряжения в оптимизированной конструкции с 20% массы от исходного больше допустимого значения. Таким образом, наилучшим вариантом конструкции будем считать топологическую оптимизацию с 25% массы от исходной модели, максимальное напряжение ( $\sigma_{\max} = 240,83 \text{ МПа}$ ) в которой не выходит за пределы допустимых значений. В таблице 2 приведены данные вариантов оптимизированного кронштейна.

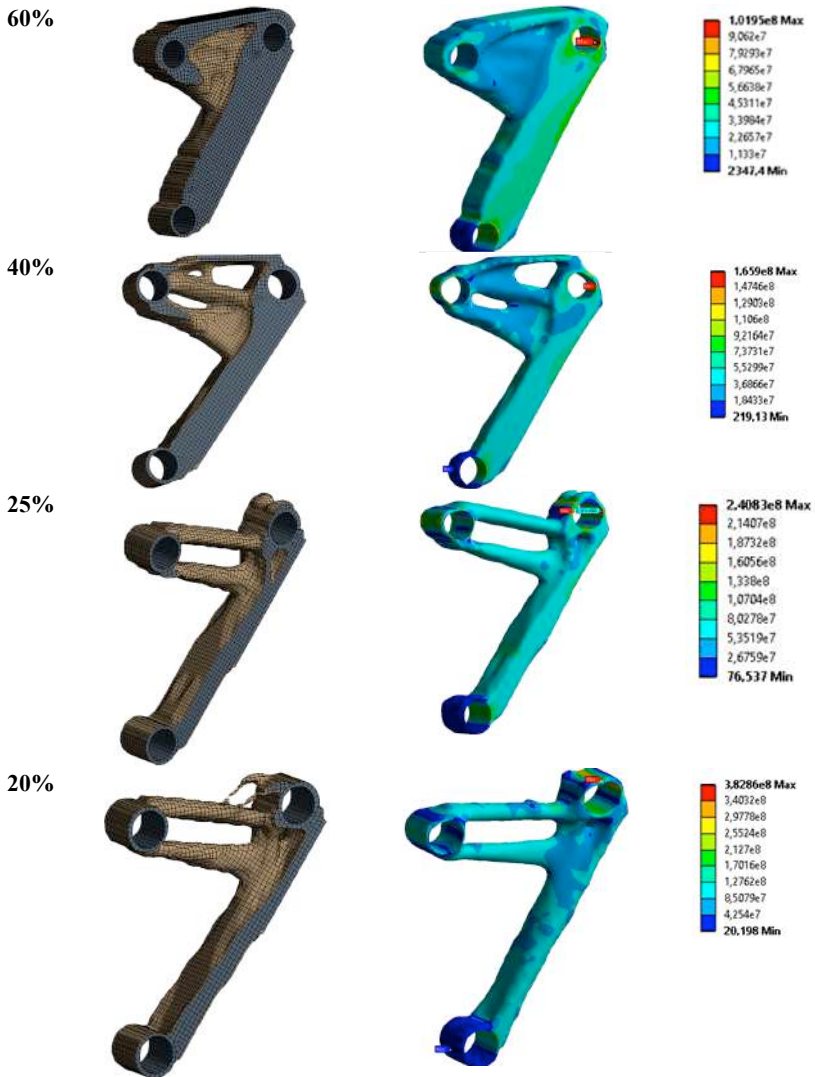


Рис.2 – конечно-элементная сетка и напряженно-деформированное состояние оптимизированных конструкций с разной долей массы от исходной

**Таблица 2 – Сравнение результатов топологической оптимизации**

Доля от массы исходной конструкции, %	Масса конструкции, кг	Максимальные напряжения в оптимизированной конструкции, МПа
100%	0,1622	90,962
60%	0,1004	101,95
40%	0,0697	165,90
25%	0,0463	240,83
20%	0,0393	382,86

**Сравнение результатов, полученных в пакетах ANSYS и Femap**

Проводился расчет по оптимизации топологии кронштейна в конечно-элементном программном комплексе Femap. Масса оптимизированной конструкции составляла 25% от исходной.

Для сравнения оптимизированных моделей необходимо обработать и посчитать НДС конструкции, полученной в пакете Femap. Используем модули ANSYS Spaceclaim и ANSYS Mechanical (см. рис. 3).

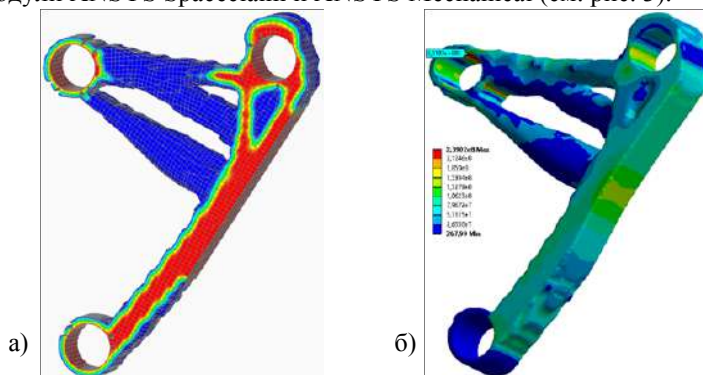


Рис.3 – оптимизированная модель в пакете Femap: а - конечно-элементная модель; б - НДС обработанной конструкции

Обе программы используют одинаковые методы решения задачи топологической оптимизации: SIMP и BESO. Однако геометрия оптимизированной конструкции у них получается отличной друг от друга. Модель, полученная в пакете Femap, имеет три «полки», соединяющие проушину и верхнее отверстие, тогда как в модели из пакета ANSYS таких «полок» две и они расположены под прямым углом.

Соответственно, конструкции различаются и по массе (см. табл. 3): масса модели из ANSYS меньше массы модели из пакета Femap, тогда как максимальные напряжения больше.

**Таблица 3 – Сравнение результатов топологической оптимизации**

Решатель	Масса оптимизированной конструкции, кг	Максимальные напряжения в оптимизированной конструкции, МПа
Femap	0,0545	239,02
ANSYS	0,0463	240,83

С помощью численного решения получены новые топологии кронштейна, с заданной жесткостью и сниженной массой от исходной модели в 3 и 3,5 раза. Разные программы-решатели (ANSYS и Femap) выдают отличные друг от друга решения при том, что методы (SIMP и BESO) в программах, базирующихся на методе конечных элементов, используются одинаковые. Результаты поверочного расчета методом конечных элементов показали достаточную прочность конструкций с рассчитанной топологией в пакетах программ ANSYS и Femap.

#### Литература:

1. Башин К. А., Торсунов Р. А., Семенов С. В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2017. — № 51. — С. 51—61.
2. Марчук, Н. И., Прасоленко Н. И. Решение задач топологической оптимизации конструкций с использованием программы ANSYS // Новая наука: опыт, традиции, инновации. — 2017. — Т. 2, № 4. — С. 196—199.
3. Dekker A. Femap topology optimization. Version 10.3/ Siemens PLM. — 1994. — 37 p.

## СЕКЦИЯ АЭРОДИНАМИКА И АЭРОУПРУГОСТЬ

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЗВЕСЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ НА ОСНОВЕ OPENMP**

**А.А. Афанасенков<sup>1</sup>, Т.А. Хмель<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [afanasev4@gmail.com](mailto:afanasev4@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт теоретической и прикладной механики им.  
С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, [khamel@itam.nsc.ru](mailto:khamel@itam.nsc.ru)  
Научный руководитель: Хмель Т.А., д. ф.-м. н., ведущий научный  
сотрудник

*Современные задачи требуют все большие и большие вычислительных мощностей. Стандартные методы обработки программного кода не могут полностью реализовать мощности процессоров без использования дополнительных инструментов. Полученные результаты расчета двухмерной задачи о распространении детонации в канале показали эффективность метода параллельного программирования [1]. Данная работы посвящена исследованию методов параллельного программирования на основе библиотеки OpenMP, а также оценки их эффективности.*

*Modern tasks require more and more computing power. Standard methods of processing program code cannot fully realize the power of processors without the use of additional tools. The obtained results of calculating the two-dimensional problem of the propagation of detonation in the channel showed the effectiveness of the parallel programming method [1]. This work is devoted to the study of parallel programming methods based on the OpenMP library, as well as the assessment of their effectiveness.*

**Физико - математическая модель.** Метод исследуется на задаче распространения детонации в газорзвесимикроразмерных или наноразмерных частиц алюминия в плоском канале длиной 0,8 метра, шириной 0,01 метра. Физико-математическая модель представлена в работах [2-5]. Основные уравнения вытекают из законов сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются уравнениями состояния идеального газа и законами теплообмена и сопротивления частиц с учетом сверхзвукового обтекания. Горение алюминия описывается уравнением приведенной кинетики Аррениусовского типа. Интегральное тепловыделение  $Q$  включает в себя тепловой эффект реакции горения частиц, исключая затраты тепла на плавление и испарение материала частиц. В рамках простейшей модели одностадийной кинетики величина  $Q$  постоянна для однородных по концентрациям взвесей и



определяется из условия соответствия эмпирическим данным по скорости нормальной детонации [6]. Особенность описания детонации неоднородных взвесей заключается в том, что  $Q$  зависит от начального состава локального объема смеси.

**Численный метод.** Для решения задачи использовалась TVD схема 2-го порядка аппроксимации. Для распараллеливания расчетов (в том числе и наиболее затратных схем TVD и Джентри-Мартина-Дэйли) использовалась библиотека OpenMP [6].

Далее на рис. 1 приведено сравнение кодов без параллельного программирования и с использованием параллельного программирования соответственно.

<p><b>а</b></p> <pre> do j=1,nx1   do i=1,nx1     sqro=sqrt(roq(i,j))     sqrol=sqrt(roq(i,j+1))     oeqq=1/(sqro+sqrol)     su=(sqro*ug(i,j)+sqrol*ug(i,j+1))*oeqq     sv=(sqro*vg(i,j)+sqrol*vg(i,j+1))*oeqq     sh=(sqro*hg(i,j)+sqrol*hg(i,j+1))*oeqq     sc=sqrt((g1-1)*(sh-su)**2/2-sv**2/2)     suy(i,j)=su     svy(i,j)=sv     shy(i,j)=sh     scy(i,j)=sc     amax=amax1(amax,sv-sc,sc-sv,sv,-sv,sv+sc,-sv-sc)   enddo enddo </pre>	<p><b>б</b></p> <pre> !\$omp parallel do schedule(auto) num_threads(4) !\$omp private(a) firstprivate(sqro,sqrol,oeqq, !\$omp su,sv,sh,sc)   do j=1,nx1     do i=1,nx1       sqro=sqrt(roq(i,j))       sqrol=sqrt(roq(i,j+1))       oeqq=1/(sqro+sqrol)       su=(sqro*ug(i,j)+sqrol*ug(i,j+1))*oeqq       sv=(sqro*vg(i,j)+sqrol*vg(i,j+1))*oeqq       sh=(sqro*hg(i,j)+sqrol*hg(i,j+1))*oeqq       sc=sqrt((g1-1)*(sh-su)**2/2-sv**2/2)       suy(i,j)=su       svy(i,j)=sv       shy(i,j)=sh       scy(i,j)=sc       amax=amax1(amax,sv-sc,sc-sv,sv,-sv,sv+sc,-sv-sc)     enddo   enddo !\$omp end parallel do </pre>
--	--

Рис. 1 – Примеры кода программы без использования параллельного программирования (а) и с использованием параллелизма (б)

Параллельная область задается следующими строками:  
 !\$ompparallel  
 (do для указания, что распараллеливание ведется по циклу)  
 ...параллельная область...  
 !\$ompendparallel

Параметр schedule(auto) задает размеры объема данных, с которыми будет работать поток; num\_threads(4) – функция, которая устанавливает количество используемых потоков в параллельной области; private(переменные) и firstprivate(переменные) – указывают на те переменные, которые будут использованы только внутри параллельной области и их конечные значения не используются вне этой области.

**Анализ результатов.** Параметры загрузки процессора приведены на рис. 2.

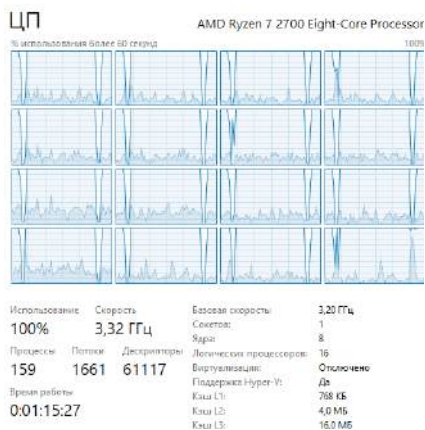
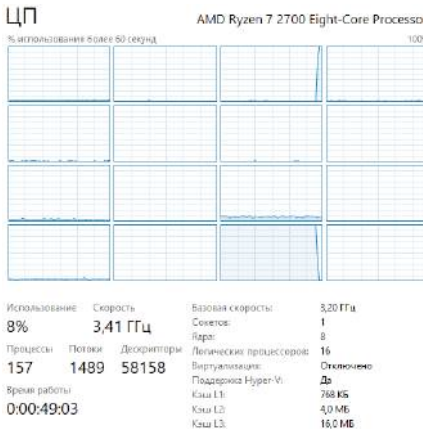


Рис. 2 – Параметры загрузки процессора без использования параллельного программирования (а) и с использованием параллелизма(б)

На рис. 3 представлены времена, затраченные на каждый проход в программе.

```
time, periods 0.10040E-01
period time= 196.725209700000
time, periods 0.20054E-01
period time= 198.091341800000
time, periods 0.30091E-01
period time= 193.647270900000
time, periods 0.40130E-01
period time= 197.542577200000
time, periods 0.50166E-01
period time= 195.077614600000
time, periods 0.60201E-01
period time= 183.241262200000
time, periods 0.70221E-01
period time= 188.995854700000
time, periods 0.80269E-01
period time= 192.430494300000
time, periods 0.90296E-01
period time= 181.712109300000
time, periods 0.10035E+00
period time= 191.088285600000
time, periods 0.11036E+00
period time= 190.390063400000
```

а

```
time, periods 0.10043E-01
period time= 44.4930014000001
time, periods 0.20079E-01
period time= 47.0362550000000
time, periods 0.30080E-01
period time= 45.7708052000007
time, periods 0.40130E-01
period time= 46.9468949000002
time, periods 0.50135E-01
period time= 46.1024428000001
time, periods 0.60181E-01
period time= 43.9021971000002
time, periods 0.70207E-01
period time= 45.1792411000006
time, periods 0.80235E-01
period time= 45.6228004999994
time, periods 0.90281E-01
period time= 43.3911255000003
time, periods 0.10028E+00
period time= 44.7983246999993
time, periods 0.11029E+00
period time= 45.0599900000007
```

б

Рис. 3 –Время, затраченное на каждый проход программы без использования параллельного программирования (а) и с использованием параллелизма(б)

На рис. 4 показаны времена, затраченные на некоторые из циклов программы.

time spend 1: 2.16788999989003E-002	time spend 1: 7.775600000059057E-003
time spend 2: 2.084049999984927E-002	time spend 2: 7.571899999675225E-003
time spend 3: 0.288785599999983	time spend 3: 2.760540000053879E-002
time spend 4: 9.454320000008920E-002	time spend 4: 1.516730000003008E-002
time spend 5: 0.310541199999964	time spend 5: 2.3474100000038508E-002
time spend 6: 7.183000000168249E-004	time spend 6: 9.384000004502013E-004
time spend 7: 1.881360000015775E-002	time spend 7: 4.106599999431637E-003
time spend 8: 5.391680000002452E-002	time spend 8: 1.108449999992445E-002
time spend 9: 5.911070000001928E-002	time spend 9: 1.179769999998825E-002
time spend 10: 1.502150000010261E-002	time spend 10: 2.178050000020448E-002

а

б

Рис. 4 –Время, затраченное на каждом цикле TVD-схемы без использования параллельного программирования (а) и с использованием параллелизма(б)

На рис. 5 представлены сравнения результатов программы без использования параллельного программирования и с его использованием.

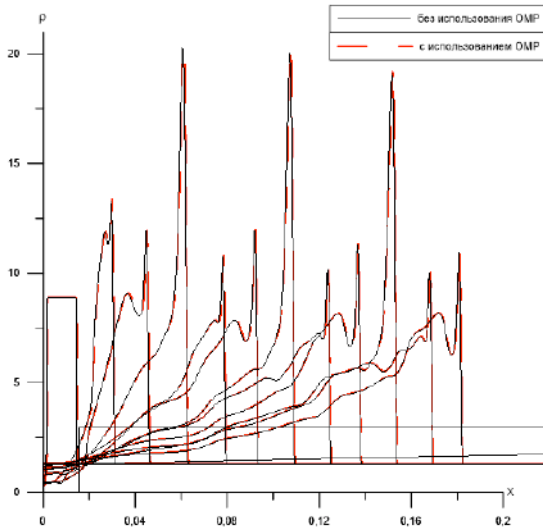


Рис. 5 –График плотностей частиц, полученный программой без использования параллельного программирования и с использованием параллелизма

**Заключение.** Установлено, что при использовании параллельного алгоритма время, затраченное на 1 проход, сокращается более, чем в 4

раза. При этом конечный результат не изменился. Таким образом, применение алгоритма к большему числу циклов может привести к сокращению общего времени расчета в несколько раз в зависимости от количества используемых потоков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00295.

#### Литература:

1. *Хмель Т.А., Федоров А.В.* Численные технологии исследования гетерогенной детонации газозвесей // Математ. моделирование. - 2006. - Т.18, No.8. -С. 49-63.
2. *Хмель Т.А., Федоров А.В.* Моделирование плоских волн детонации в газозвеси наноразмерных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. - 2018. -Т.54, No.2. -С. 71-81.
3. *Lavruk S.A., Fedorov A.V., Khmel T.A.* Cellular detonation propagation and degeneration in bi-disperse gas suspensions of micron- and nano-sized aluminum particles // Shock Waves. 2020. Vol. 30, № 3. P. 273–286.
4. *Хмель Т.А.* Моделирование ячеистой детонации в газозвесях субмикронных и наноразмерных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. - 2019. -Т.55, No.5. -С. 73-82.
5. *Khmel T., Tolkacheva S.* Numerical study of marginal modes of heterogeneous detonation in non-uniform mixtures // AIP Conference Proceedings : XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2020) (Novosibirsk, 1–7 Nov. 2020). -Vol.2351, No.1. - S.I.: AIP Publishing, 2021. -030020(8) p.
6. *Khmel T.A., Tolkacheva S.I.* Model of reduced kinetics for describing heterogeneous detonation in gas particle mixtures with non-uniform concentration distribution // Journal of Physics: Conference Series : XXXV Siberian Thermophysical Seminar (Novosibirsk, 27-29 Aug. 2019). - Vol.1382(7). -S.I.: IOP Publishing, 2019. -012102 p.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЁННОГО ТЕПЛООБМЕНА ДАТЧИКА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ

И.Р. Васнев<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Институт теоретической и прикладной механики им.

С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, [vasnev@itam.nsc.ru](mailto:vasnev@itam.nsc.ru)

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Н.Н. Федорова<sup>2</sup>

*Работа посвящена разработке математической модели в Ansys Fluent для расчёта сопряжённого теплообмена между сверхзвуковым потоком воздуха при числах Маха  $M_\infty=3,4,5$  и медной пластины, моделирующей чувствительный элемент термодатчика. В работе представлены результаты расчётов для данных чисел Маха при изотермических  $T_{wall}=300...1200$  К и адиабатических условиях на стенке канала; приведено сравнение с экспериментальными данными для  $M_\infty=4$ . Результаты показывают, что при увеличении числа Маха максимальная температура прогрева датчика увеличивается, а время прогрева уменьшается.*

*The work is devoted to the development of a mathematical model in Ansys Fluent for calculating the conjugate heat transfer between a supersonic air flow at Mach numbers  $M_\infty=3,4,5$  and a copper plate modeling a thermocouple sensing element. The paper presents the results of calculations for these Mach numbers at isothermal  $T_{wall}=300...1200$  K and adiabatic conditions on the channel wall; a comparison with experimental data for  $M_\infty=4$ . The results show that as the Mach number increases, the maximum sensor warm-up temperature increases and the warm-up time decreases.*

Создание системы охлаждения является важной задачей при проектировании двигателей высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА). Наиболее теплонапряжённым техническим устройством ЛА является камера сгорания, где тепловые потоки могут достигать нескольких МВт/м<sup>2</sup> [1]. Такая тепловая нагрузка требует использования высокопрочных сплавов и систем отвода тепла.

Эксперименты по определению тепловых нагрузок проводятся в аэродинамических трубах постоянного или импульсного действия. Трубы постоянного действия позволяют проводить эксперименты длительностью до 100 секунд и, как следствие, израсходуют много рабочего газа, что делает эксперимент дорогим. В импульсных трубах эксперимент длится 100÷200 миллисекунд, что подразумевает низкую стоимость эксперимента из-за низкого расхода газа. Но такое короткое рабочее время не позволяет определить максимальные тепловые нагрузки на стенки модели.

В эксперименте тепловые нагрузки в высокоскоростных потоках измеряются с помощью датчиков теплового потока, установленных в

стенках модели, или с помощью визуальных бесконтактных методов, основанных на измерении оптических свойств среды с помощью специальных окон в модели.

Измерения тепловых потоков с помощью датчика основано на электрических (Джоуля и Пельтье) и тепловых (нестационарный метод, закон Фурье) эффектах [2]. Для измерений в высокоскоростных течениях используется термопара, принцип действия которой основан на явлении возникновения электродвижущей силы внутри замкнутой электрической цепи, сформированной разными проводниками (эффект Зеебека). Это напряжение прямо пропорционально разности температурных значений проводников. Возникающий в цепи ток позволяет проводить измерения температуры пластины, которая соединена с проводниками.

Нагрев датчика или стенок модели можно изучать методом численного моделирования, которое позволяет исследовать нестационарный процесс в широком диапазоне параметров течения и физических свойств материалов. Для этого необходимо решить сопряжённую задачу, включающую решение уравнений, описывающих движение жидкости или газа, а также уравнения теплопроводности в зонах, соответствующих твердым зонам.

Целью данной работы является разработка методики расчёта сопряжённого теплообмена сверхзвукового турбулентного потока воздуха с медным датчиком в условиях экспериментов [1,3], проведённых в импульсной высокоэнтальпийной аэродинамической установке [4].

Представлены результаты двумерных расчётов сопряжённой задачи на основе численного решения осреднённых по Фавру уравнений Навье-Стокса и уравнения теплопроводности в твердом теле. Расчёт проведен в три этапа, геометрия которых представлена на рис. 1.

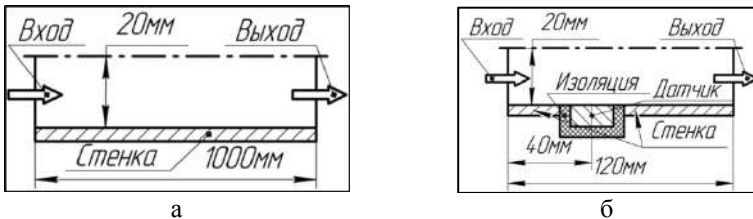


Рис. 1 - Геометрия каналов: а – длинный прямой канал, б – канал с датчиком

На первом этапе (рис. 1а) на входе задаются параметры потока (таблица 1), которые соответствуют экспериментальным, и

рассчитываются профили газодинамических и турбулентных параметров с учетом пограничного слоя толщиной 11 мм. На втором этапе (рис. 1б) полученные профили задаются на входе в расчётную область канала с датчиком, и рассчитывается установившееся сверхзвуковое течение, которое используется в качестве начальных данных для следующего этапа. На третьем этапе (рис. 1б) проведен расчёт нестационарной задачи с учетом сопряженного теплообмена на границе газ/датчик. Теплообмен датчика с внешней средой и стальной стенкой не учитывается.

**Таблица 1 – Параметры на входе в канал**

$M_\infty$	$P_0$ , кПа	$P_\infty$ , кПа	$T_0$ , К	$T_\infty$ , К
3	1600	45	1900	676
4	9100	60	2000	476
5	32000	71	2700	452

В расчётных областях построена структурированная сетка из четырехугольных элементов, которая сгущалась к стенкам. Для этапа 1 выполнены расчёты на измельчающихся сетках, параметры которых представлены в таблице 2. Для дальнейших расчётов была выбрана сетка 3, которая обеспечивает разрешение ламинарного подслоя ( $y^+ \sim 1$ ) турбулентного пограничного слоя, и более экономична, чем сетка 4.

На рисунке 2а показан начальный этап прогрев датчика, полученный в расчетах с моделью турбулентности  $k-\omega$  SST (линия 1),  $k-\varepsilon$  RNG (линия 2) в сравнении с данными эксперимента (точки). Модель  $k-\omega$  лучше описывает экспериментальные данные, поэтому будет использоваться в дальнейших расчётах.

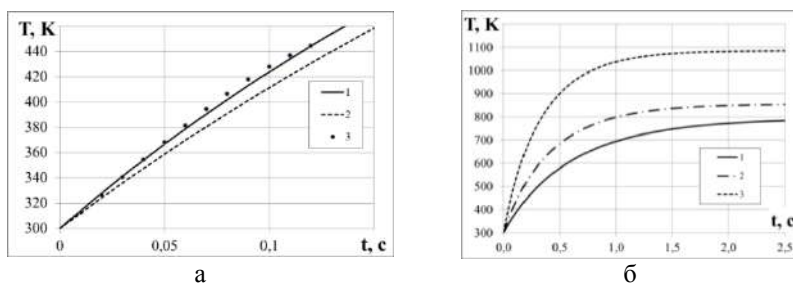


Рис. 2 – Температура датчика: а – на начальном участке прогрева для  $M_\infty=4$ ; б – за всё время прогрева для разных чисел Маха

На рисунке 2б показан прогрев датчика при числах Маха набегающего потока  $M_\infty=3$  (линия 1),  $M_\infty=4$  (линия 2) и  $M_\infty=5$  (линия 3).

При увеличении числа Маха увеличивается вклад вязкого нагрева в формирование профиля температуры. Из-за более высоких температур в пристенной области поток с бóльшим числом Маха быстрее нагревает датчик, и максимальная температура прогрева также увеличивается.

В таблице 2 приведены ключевые значения в течениях с разными числами Маха, соответствующие рисунку 2б. Сравнение показывает, что с ростом числа Маха набегающего потока максимальная температура прогрева растет, а время, которое потребуется для достижения теплового баланса, сокращается.

**Таблица 2 – Результаты расчёта с разными числами Маха**

	$q_0$ , МВт/м <sup>2</sup>	$T_{\max}$ , К	$t_{\text{прогрева}}$ , с
M = 3	0,91	789	2,96
M = 4	1,5	850	2,05
M = 5	2,73	1076	1,64

В результате численного моделирования сопряжённого теплообмена сверхзвукового потока воздуха и медного датчика проведена верификация модели турбулентности, установлены максимальные температуры и времена прогрева датчика.

#### Литература:

1. Marat Goldfeld The heat flux research in hydrogen supersonic combustor at Mach number of 4 // International Journal of Hydrogen Energy, 2021 Volume 46, Issue 24, С. 13365-76.
2. Moreira T. A., Colmanetti A.R.A., Tibirica C.B., Heat transfer coefficient: a review of measurement techniques // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019 Volume 41, Issue 6, №264.
3. Гольдфельд М.А. Процесс самовоспламенения и стабилизации пламени в водородной сверхзвуковой камере сгорания при поперечной подаче топлива //Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 4. С. 601-613.
4. Goldfeld M A, Maslov A A, Starov A V, Shumskii V V, and Yaroslavtsev M I, IT-302M hot-shot wind tunnel as a tool for the development of hypersonic technologies //AIP Conf Proc. 2016. Vol. 1770, No. 030020 doi.org/10.1063/1.4963962.



## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ВОДОРОДНО – ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ С ИНЕРТНЫМ ПОРИСТЫМ ФИЛЬТРОМ

К.А. Вышегородцев<sup>1</sup>, Д.А. Тропин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский Государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск, [vyshegorodcev.k.a@gmail.com](mailto:vyshegorodcev.k.a@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А.  
Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, [d.a.tropin@itam.nsc.ru](mailto:d.a.tropin@itam.nsc.ru)  
Научный руководитель: Тропин Д. А., к. ф.-м. н., старший научный  
сотрудник

*При эксплуатации горючих газов могут происходить аварийные взрывы, последствия которых разрушительны. Экспериментальные исследования [1-4] и математическое моделирование [5-7] показали, что детонационные волны могут быть подавлены с помощью инертных фильтров. Данная работа посвящена исследованию характеристик фильтра, влияющих на детонацию.*

*When operating flammable gases, emergency explosions can occur, the consequences of which are devastating. Experimental studies [1-4] and mathematical modeling [5-7] have shown that detonation waves can be suppressed using inert filters. This work is devoted to the study of filter characteristics that affect detonation.*

**Физико - математическая модель.** Рассматривается ударная труба длиной 1 метр, шириной 0,1 метра. С левого и правого концов труба закрыта. Труба заполнена водородно – воздушной смесью при атмосферных параметрах. На отметке 0,5 метра располагается инертный пористый фильтр. Фильтр представляет из себя облако инертных неподвижных частиц. Математическая модель является системой дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие двух фаз: реагирующей газовой смеси и инертных частиц. Данная схема представлена в работе [5]. Для учета протекающих химических реакций в газовой смеси использовалась упрощенная Аррениусовская схема. Данная схема описывает протекающие реакции одним уравнением, которое было верифицировано в работе [8].

**Анализ результатов.** В работе рассматривались три конфигурации фильтра: сплошной фильтр, фильтр с вырезом в середине, фильтр, состоящий из пяти полос. В случае сплошного фильтра рассматривались частицы диаметром 50, 100 и 200 микрометров, с объемными концентрациями от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$ . В зависимости от концентрации частиц было получено два режима распространения детонационной волны после вхождения в фильтр: распространение детонационной волны и срыв детонации. Режим распространения ослабленной детонационной

волны реализуется при объемных концентрациях меньше критической. В таком режиме параметры детонационной волны после вхождения в фильтр падают до более низких значений, после чего она продолжает распространяться в стационарном режиме (рис. 1).

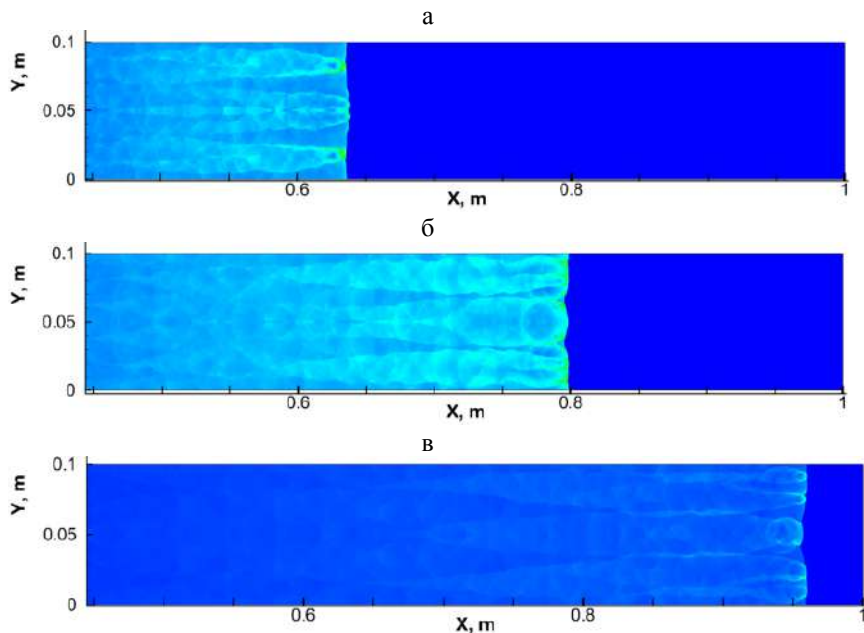


Рис. 1 – Распределение давлений. Параметры фильтра:  $d = 50 \text{ мкм}$  ,  $m_2 = 5 \cdot 10^{-4}$  . Моменты времени: а – 90 мс, б – 180 мс, в – 270 мс.

Режим ослабленной детонационной волны

При этом ячеистая структура детонационной волны сохраняется, но средний размер ячейки увеличивается (рис. 2).

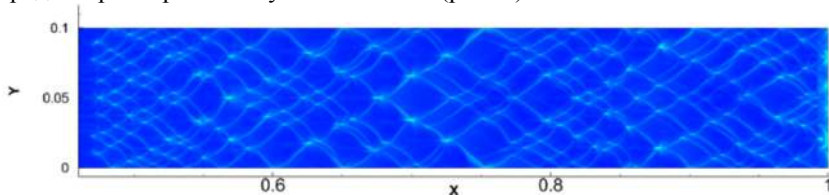


Рис. 2 – График максимумов давлений. Параметры фильтра:  $d = 50 \text{ мкм}$  ,  $m_2 = 5 \cdot 10^{-4}$  . Режим ослабленной детонационной волны

Режим срыва детонации реализуется при концентрациях больше или равной критической. В таком режиме параметры детонационной волны после вхождения в фильтр падают, пока не произойдет срыва детонации – разделения детонационной волны на волну горения и отошедшую ударную волну (рис. 3). Ячеистая структура при этом разрушается (рис. 4).

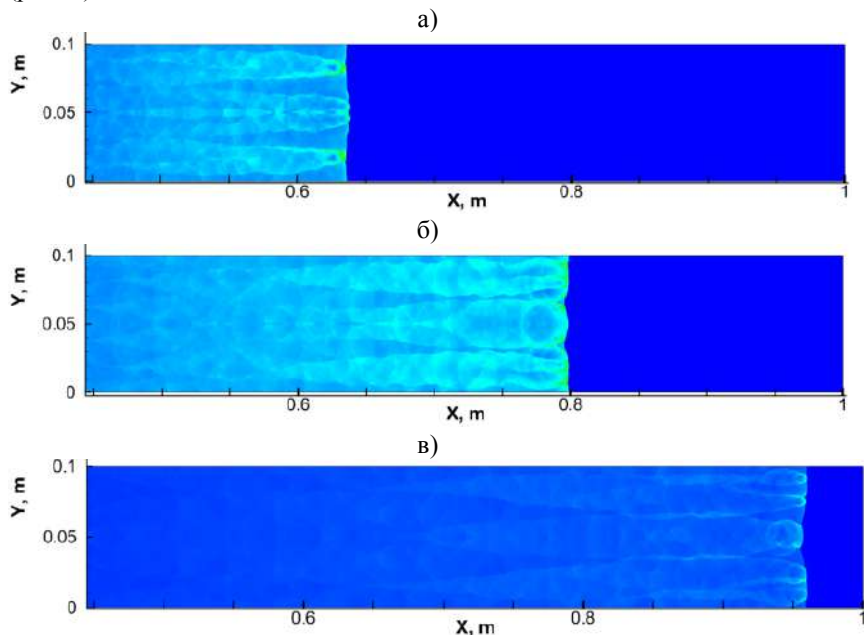


Рис. 3 – Распределение давлений. Параметры фильтра:  $d = 50\text{мкм}$ ,  $m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ . Моменты времени: а) 90 мс, б) 180 мс, в) 270 мс.

Режим срыва детонационной волны

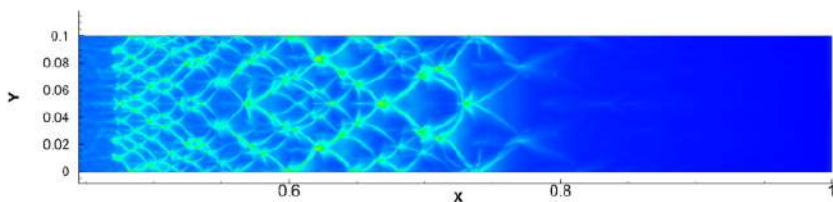


Рис. 4 – График максимумов давлений. Параметры фильтра:  $d = 50\text{мкм}$ ,  $m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ . Режим подавления детонационной волны

В ходе работы были получены значения критических концентраций для частиц всех диаметров. Они составили  $2 \cdot 10^{-3}$ ,  $4 \cdot 10^{-3}$ ,  $9 \cdot 10^{-3}$  для частиц диаметром 50, 100 и 200 микрон соответственно.

**Заключение.** В результате работы численно решена задача о срыве детонации в водородно – воздушной смеси с помощью инертного пористого фильтра с учетом упрощенной химической кинетики на основе разработанной ранее физико – математической модели. Выявлено, что наиболее эффективны для ослабления и подавления детонационной волны фильтры большей концентрации и меньшего диаметра частиц. Получены критические концентрации частиц сплошного фильтра разных диаметров, при которых происходит срыв детонации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>.

#### Литература:

1. P. Wolanski, J. C. Liu, C. W. Kauffman, J. A. Nicholls, M. Sichel, *Archivum Combustion* 8(1), 15-32(1988)
2. G. Yu. Bivol, S. V. Golovastov, V. V. Golub, *Journal of loss Prevention in the Process Industries* 43, 311-314 (2016)
3. G. Yu. Bivol, S. V. Golovastov, V. V. Golub, *Shock Waves* 28, 1011-1018(2018)
4. G. Yu. Bivol, S. V. Golovastov, D. Akexandrova, *Experimental Thermal and Fluid Science* 100, 124-134 (2019)
5. A. V. Fedorov, D. A. Tropin, I. A. Bedarev, *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 46(3), 332–343 (2010)
6. A. V. Fedorov, D. A. Tropin, *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 49(2), 178-187(2013).
7. D.A. Tropin, I.A. Bedarev, *Combustion Science and Technology* 193(2), 197-210 (2021).
8. I.A. Bedarev, K.V. Rylova, A.V. Fedorov, *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 51(5), 528-539 (2015).

# АЭРОУПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Ю.В. Гладышев, А.Д. Обуховский**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, vither021@mail.ru**  
**Научный руководитель: Обуховский А.Д., к.т.н., доцент**

*При монтаже и эксплуатации мостовых конструкций могут происходить аэроупругие колебания, в последствие приводящее к их разрушению. Результаты исследования секционной модели показали, что при помощи устройств гашения можно подавить колебания. Данная работа посвящена исследованию различных спойлеров для минимизации амплитуды колебаний на всех диапазонах скоростей.*

*During the installation and operation of bridge structures, aeroelastic vibrations may occur, subsequently leading to their destruction. The results of a sectional model study have shown that oscillations can be suppressed by means of damping devices. This work is devoted to the study of various spoilers to minimize the amplitude of oscillations at all speed ranges.*

**Методы исследований в аэродинамической трубе.** Наиболее достоверную информацию о процессе колебаний пролетного строения моста дают продувки в аэродинамической трубе динамически подобной модели. Однако проектирование и изготовление такой модели трудоемкий и длительный процесс. В то же время, много полезной информации о процессе может дать рассмотрение упрощенной схемы, так называемой «секционной» модели, которая может испытываться закрепленной на аэродинамических весах, либо при колебаниях в вертикальной плоскости на специальной пружинной подвеске. В некоторых публикациях термин «секционная модель» используется для обозначения секционированной или отсечной модели, в которой изгибная и крутильная жесткость моделируется металлическими стержнями переменного сечения. Распределение массы задается большим числом закрепленных на них грузов, а внешняя форма сооружения задается внешней оболочкой, состоящей из достаточно коротких отсеков, точно закрепленных на стержнях и передающих на них аэродинамические нагрузки. Зазоры между отсеками порядка миллиметра позволяют стержням деформироваться без соприкосновения отсеков между собой.

**Анализ результатов исследования секционной модели.** На рис. 1 показаны зависимости относительной амплитуды вертикальных колебаний модели  $A/H$  ( $H$  – высота поперечного сечения модели) от приведенной скорости  $V/(f_y * H)$  (амплитудно-скоростные характеристики

– АСХ) для разной степени перфорации стенок модели (сплошная стенка, малая перфорация, большая перфорация). Видно, что имеется два диапазона скоростей, в которых происходят явные аэроупругие колебания. На скоростях от  $\sim 3$  до  $\sim 5$  наблюдаются колебания с  $A/N$  от 0,021 до 0,03. Второй диапазон скоростей начинается с  $\sim 6$  до  $\sim 11-11,8$ , при таких скоростях колебания модели со сплошными стенками и стенками с малой перфорацией не сильно отличаются, их амплитуды составляют 0,165-0,18. Но для стенок с большой перфорацией ситуация иная, при тех же самых скоростях интенсивность колебаний почти в два раза меньше ( $A/N \sim 0,1$ ). Поскольку результаты для моделей со сплошными стенками и стенкам с малой перфорацией не сильно рознятся, то в дальнейших экспериментах использовались модели со стенками с большой перфорацией и со сплошными.

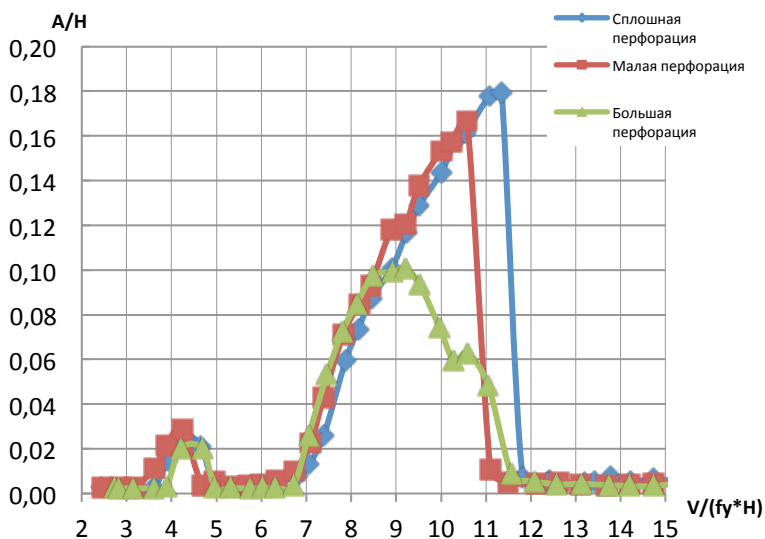


Рис. 1 – Исходная конфигурация – влияние проницаемости стенок

Для гашения колебаний моделей использовались различного рода устройства, в частности, зубчатые спойлеры (рис. 2).

Пример влияния спойлера на АСХ модели со сплошными стенками приведен на рис. 3 («Р42» и «Р43» – разные вылеты спойлера, установленного спереди и сзади модели). В рассматриваемом диапазоне приведенных скоростей от 4 до 13 у оснащенной устройствами модели практически отсутствуют колебания. Поэтому данные устройства рекомендуются к исследованию в дальнейших экспериментах.

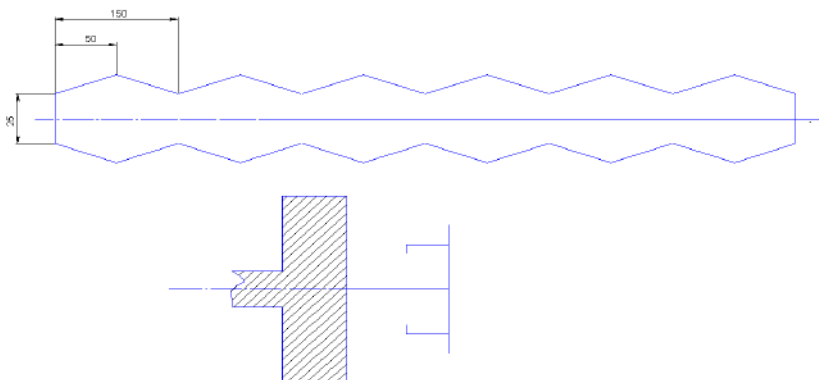


Рис. 2 – Чертёж и условные размеры зубчатого спойлера

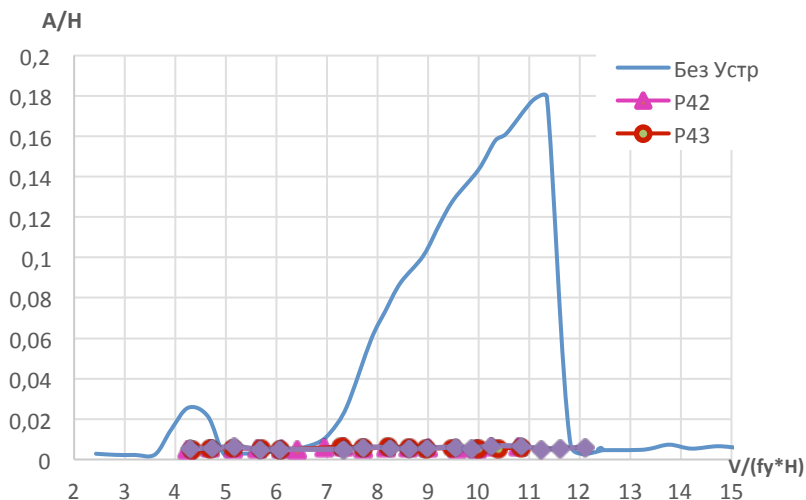


Рис. 3 – Влияние вылета спойлера на АСХ модели со сплошными стенками

**Заключение.** По результатам исследования мы определили наиболее эффективные устройства для гашения аэроупругих колебаний мостовых конструкций как для сплошных стенок, так и для крупноперфорированных стенок. По данным что приведены в график можем сделать вывод, что для сплошных стенок хорошо подходит фестоны спереди и сзади с вылетом, они гасят колебания на двух опасных диапазонах скоростей почти полностью. Так же для

крупноперфорированных стенок отлично подходят зубчатые швеллера спереди и сзади с вылетом. Они удовлетворительно гасят аэроупругие колебания, но к сожалению не полностью, хотя могут являть хорошим вариантом для дальнейшей эксплуатации.

Литература:

1. Телкова Ю. В. Пассивное гашение аэроупругих колебаний / Ю. В. Телкова, С. Д. Саленко, А. Д. Обуховский // Красная линия. – 2011. – № 57, вып. «Дороги». – С. 54-57.

2. Пассивные гасители аэроупругих колебаний пролетного строения моста на стадии монтажа / Ю. В. Телкова, А. Д. Обуховский, С. Д. Саленко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия политематическая. – 2011. – Вып. 2. – С. 4.

## **ЛЕГКИЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ САМОЛЕТ КОРОТКОГО РАЗБЕГА ТВС 2МС**

**А.С. Горшенев**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [osen2000as36@gmail.com](mailto:osen2000as36@gmail.com)**

*В современной авиации всегда была необходимость создания универсального летательного аппарата, способного сочетать в себе только лучшие качества нескольких воздушных средств передвижения. В данной статье рассматривается легкий многоцелевой самолет короткого взлета и посадки с распределенной силовой установкой ТВС 2МС, способный составить конкуренцию вертолетам или же полностью заменить их.*

*In modern aviation, there has always been a need to create a versatile aircraft capable of combining only the best qualities of several air vehicles. This article considers a light multipurpose aircraft of short takeoff and landing with a distributed power plant TVS 2MS, which can compete with helicopters or completely replace them.*

На сегодняшний день остро стоит вопрос о создании самолета, способного доставлять грузы и людей в удаленные регионы страны с минимальной площадкой для взлета. Модернизация Ан-2 – ТВС 2МС может садиться в самых труднодоступных местах, а так же стать заменой вертолета Ми-8. Разработка проекта началась в Сибирском научно-исследовательском институте авиации им. Чаплыгина в октябре 2010 года. Основными задачами являлись проектирование и создание самолета с коротким разбегом при взлете и посадке, переход на



авиационный керосин ТС-1, автономность от наземных служб, увеличение запаса ресурса двигателя, дальности полета и грузоподъемности, с сохранением всех базовых характеристик самолета. В СибНИА продолжаются исследования по улучшению летно-технических характеристик (ЛТХ) самолета путем модернизации. Испытания проводятся в дозвуковой аэродинамической трубе Т-203 и в летном эксперименте.

На данный момент, в ходе летных испытаний и демонстрации на выставке МАКС-2021 (рис. 1), ТВС 2МС подтвердил свои ЛТХ в сравнении с исходным Ан-2. Все они увеличились на 15-20%, дальность полета на крейсерской скорости возросла в 1,5 раза, а потребление керосина снизилось на 10 %. Было отмечено, что вибрации и шум снизились, появилось терморегулирование за счет системы отбора воздуха с силовой установки, что значительно повысило комфорт во время полетов.



Рис. 1 – Демонстрация ТВС 2МС на МАКС 2021

#### Литература:

1. А. Величко. ТВС-2МС — вторая жизнь легендарного «кукурузника» [электронный ресурс] // Авиация России, 2017. URL: <https://aviation21.ru/tvs-2ms-vtoraya-zhizn-legendarnogo-kukuruznika/> (accessed: 06.02.2017).
2. TVOI54.RU. Творцы кукурузников – обновленный сибирский АН-2 [электронный ресурс] // Твой Новосибирск, 2016. URL: <https://tvoi54.ru/posts/31-tvorcy-kukuruznikov-obnovlenniy-sibirskii-an-2.html> (accessed: 28.07.2016).
3. Dale Volkov. Ан-2МС [электронный ресурс] // Уголок неба, 2021. URL: <http://www.airwar.ru/enc/la/an2ms.html> (accessed: 2021).

## РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА МАЛЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

С.В. Лукашевич<sup>1</sup>, А.Д. Желонкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, azerot31@ngs.ru

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, notteamseshkyga@gmail.com

Научный руководитель: Лукашевич С.В., к. ф.-м. н., научный сотрудник

*При обтекании потоком вогнутой стенки в пограничном слое образуются вихри Гёртлера. Существенной проблемой в экспериментальных исследованиях является генерация возмущений, которые в условия неустойчивости Гёртлера приведут к возникновению вихрей Гёртлера. Для генерации возмущений был разработан способ [1], который заключается в создании на обтекаемой поверхности возмущений потока типа вдув/отсос. Данная работа посвящена разработке источника малых нестационарных возмущений.*

*When a flow is flowing around a concave wall, Goertler vortices are formed in the boundary layer. An essential problem in experimental studies is the generation of perturbations, which, under conditions of Goertler instability, will lead to the appearance of Goertler vortices. To generate disturbances, a method was developed [1], which consists in creating flow disturbances of the injection/suction type on the streamlined surface. This work is devoted to the development of a source of small non-stationary disturbances.*

**Введение.** В настоящее время до сих пор существует весома проблема в аэродинамике летательных аппаратов: ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое [2]. При более подробном рассмотрении данный переход состоит из трех стадий: восприимчивости пограничного слоя к различным рода возмущениям, линейного роста и нелинейного роста с переходом в турбулентность [3].

Специфической особенностью потоков, протекающих над вогнутыми стенками является возникновение центробежной силы, которая провоцирует перетекание частиц из верхней области пограничного слоя на место частиц, расположенных у стенки, что создает неустойчивость течения называемой неустойчивостью Гёртлера или Тейлора-Гёртлера [4]. Вследствии этого и образуются вихри Гёртлера. Неустойчивость Гёртлера широко распространена в пограничных слоях и наблюдается вблизи искривлённых поверхностей на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях [5]. Для изучения неустойчивости Гёртлера в стадии линейного роста возмущений будет использован метод, при котором будут создаваться периодические возмущения потока.

**Принцип действия источника.** Устройство должно обеспечивать периодический вдув/отсос на поверхности модели с частотой до 1 кГц. Для выполнения данного условия было разработано устройство, где источник механической энергии генерирует периодические возмущения потока. В качестве источника энергии служит мембрана с пьезоэлементом, который будет помещен в герметичный корпус с исходящими от него трубками. Сами же трубки будут подходить к отверстиям на обтекаемой поверхности, обеспечивая периодический вдув/отсос газа (рис. 1).

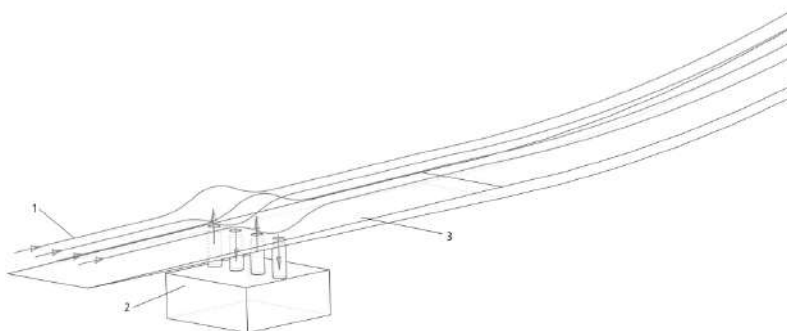


Рис. 1 – Принцип действия источника малых нестационарных возмущений: 1 – линии тока; 2 – корпус; 3 – поверхность

На пьезоэлемент подаётся напряжение, после чего мембрана начинает колебаться с заданной частотой. Источник должен обеспечивать выдувание и всасывание газа со скоростью до 5 м/с. Для достижения необходимой скорости выдуваемого и всасываемого воздуха был проведен расчет вытесняемого объема и найден объемный расход воздуха. Для пьезоэлемента с диаметром 31 мм был разработан корпус, отвечающий определенным требованиям, а именно: крепко удерживать мембрану, иметь подставку для регулировки высоты лазерного датчика, расположенного над ней и наличие отверстий для предварительного определения параметров потока. Лазерный датчик фирмы Micro – Epsilon модели optoNCDT 1605 работает по триангуляционному принципу – измерение расстояния до любого объекта с помощью треугольника. С его помощью становится возможным количественно установить изменение расстояния до мембраны во время её колебания. Регулирование высоты датчика было необходимо для нахождения и установки фокуса лазерного сенсора. Само же наличие датчика позволило измерить перемещения мембраны во время колебания

(рис. 2), что в свою очередь позволило определить объемный расход воздуха и скорость потока на выходе из отверстий.

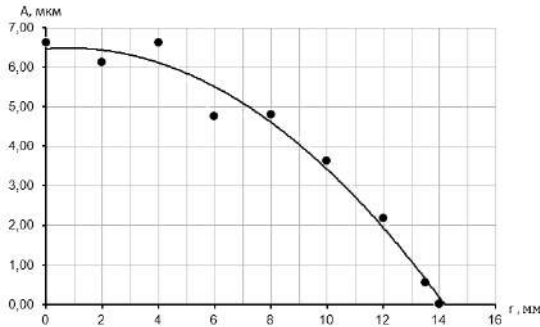


Рис. 2 – Пример распределения амплитуды  $A$  колебаний мембраны от радиуса  $r$

**Заключение.** В результате первого этапа работы был разработан прототип источника малых нестационарных возмущений типа вдув/отсос, проведены измерения его расходных характеристик и оценка возможных скоростей выдуваемой струи. Максимальный объемный расход и скорость струи составили  $43,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $1,45 \text{ м/с}$  соответственно при площади отверстия  $30 \text{ мм}^2$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00393.

#### Литература:

1. Исследование слабонелинейного развития нестационарных вихрей Гёртлера / Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А. // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т.17, № 4. – С. 487-514.
2. Морозов С.О., Шиплюк А.Н. Расчет устойчивости ламинарного пограничного слоя на поверхности профилированного гиперзвукового сопла для числа Маха  $M=6$  // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т.27, № 1, – С. 37-46.
3. Мищенко Д.В. Экспериментальное исследование порождения и развития мод нестационарной Гёртлеровской неустойчивости пограничного слоя: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 13 с.
4. Drazin P.G., Reid W.H. Hydrodynamic Stability // Cambridge University Press, Cambridge, 1981.
5. Spall R.E., Malik M.R. Goertler vortices in supersonic boundary layers // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. – 1988. – P. 88-3678.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ СКОРОСТЕЙ ГЛОБАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

А.Д. Захаров

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [shmulke02@gmail.com](mailto:shmulke02@gmail.com)  
Научный руководитель: Фурсенко Р.В., д.ф.-м.н.

*Для решения проблемы подбора констант скоростей химических реакций в данной работе предлагается использование оптимизационных методов. Данные методы позволяют подбирать параметры скоростей химических реакций, используя экспериментальные и численные данные. Реализован алгоритм поиска оптимальных параметров и исследованы особенности применения и работы оптимизационного метода.*

*To solve the problem of defining the rate constants of chemical reactions in this work, it is proposed to use optimization methods. These methods make it possible to define the parameters of the rates of chemical reactions using experimental and numerical data. An algorithm for searching for optimal parameters has been implemented, and the features of the application and operation of the optimization method have been investigated.*

Процесс горения включает в себя большое количество элементарных химических реакций, которые точно описываются с помощью детальных кинетических механизмов. Проблема использования таких механизмов заключается в большом количестве содержащихся в них веществ и реакций (например, кинетический механизм низко- и высокотемпературного горения суррогата бензина содержит 1000 веществ и 4000 реакций [1]), из-за чего растут вычислительные затраты, необходимые для проведения численных расчетов. В связи с этим детальные механизмы не могут быть практически применены для моделирования в двух- и трехмерных случаях, а также на больших пространственных масштабах. Для таких расчетов, как правило, используются редуцированные кинетические механизмы, которые представляют собой упрощенные детальные схемы. Для использования данных механизмов требуется определить константы скоростей химических реакций в определенной области условий.

Для определения параметров скоростей химических реакций в настоящей работе используется алгоритм оптимизации, заключающийся в минимизации отклонения между какими-либо характеристиками горения, полученными с использованием упрощенного механизма и

референсными значениями этой характеристики. В качестве референсных значений в данной работе используются результаты, полученные с помощью детального механизма GRI-mech 3.0 [2], однако в общем случае возможно использование экспериментальных данных. Расчеты проводились с помощью модуля «Cantera» [3].

Сравнение механизмов проводилось по нормальной скорости пламени  $U_b$ , профилям концентраций промежуточных веществ в противоточном диффузионном пламени и времени задержки воспламенения. Оптимизация параметров проводится с помощью минимизации функции (1) в процессе работы алгоритма.

$$Err = \sqrt{\sum_i^n (F_i - F_{GRI-mech\ 3.0_i})^2}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество различных точек или значений параметров, для которых проводится расчет некоторой характеристики горения,  $F_i$  и  $F_{GRI-mech\ 3.0_i}$  – значение характеристики при  $i$ -ом наборе параметров, рассчитанное с использованием оптимизируемого и детального механизмов соответственно.

В случае одностадийного механизма, уравнение скорости реакции имеет вид:

$$W = [O_2]^n [CH_4]^m * A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (2)$$

В данном случае требуется оптимизировать значение энергии активации  $E$ , предэкспоненциального множителя  $A$ , порядков  $m$  и  $n$  концентраций реагентов  $CH_4$  и  $O_2$ . На рис. 1 представлен результат оптимизации одностадийного механизма по нормальной скорости пламени. В этом случае функция (1) принимает вид:

$$Err_{Ub} = \sqrt{\sum_i^n (Ub_i - Ub_{GRI-mech\ 3.0_i})^2}. \quad (3)$$

Для исследования единственности решения и его зависимости от начальных данных была проведена оптимизация одностадийного механизма при различных начальных значениях оптимизируемых параметров.

На рис. 2 показана плоскость оптимизируемых параметров  $E$  и  $A$ . На плоскости построены кривые, соответствующие итерационным изменениям данных параметров в ходе работы алгоритма оптимизации. Из рисунка видно, что конечные точки сильно различаются и лежат на

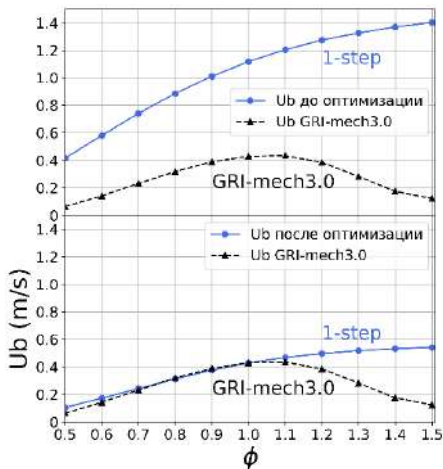


Рис. 1 - Нормальная скорость пламени до (сверху) и после (снизу) проведенной оптимизации параметров

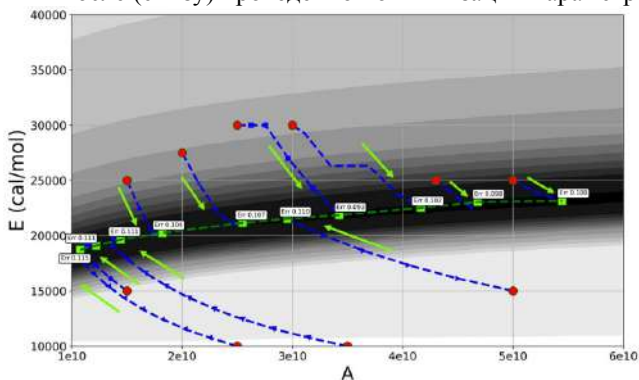


Рис. 2 – Кривые оптимизации. --- изменение параметров в ходе оптимизации. ● – начальные точки со случайными значениями параметров. ■ – конечные точки с значениями параметров, определенными алгоритмом.

определенной кривой, что говорит о том, что в данном случае решение не единственно. Для проверки алгоритма был применен метод прямого перебора для расчета значений функции (3) по всей области параметров, приведенной на рисунке. Результаты расчета представлены на плоскости монохромными областями. Видно, что кривая, образованная конечными точками, соответствует наиболее темным областям, в которых значение

функции (3) минимально. Также применение метода перебора позволило определить отсутствие изолированных областей локальных минимумов целевой функции.

Помимо этого, в работе была проведена оптимизация при различных значениях начальных параметров и с использованием различных характеристик горения. Исследовалось влияние количества оптимизируемых параметров на конечный результат. Также была исследована и подтверждена возможность оптимизации по нескольким характеристикам горения одновременно.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости предложенного метода оптимизации для решения задач подбора константных параметров скоростей глобальных механизмов химических реакций.

Литература:

1. Curran H.J., Pitz W.J., Westbrook C.K. et al. // Proc. Combust. Inst. 1998. V. 27. P. 379.

2. Gas Research Institute reaction mechanism (GRI Mech, version 3.0) [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html> Дата доступа: 20.11.2020.

3. Cantera user's guide [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.cerfacs.fr/cantera/mechanisms/meth.php> Дата доступа: 15.10.2020.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОГО ТОПЛИВА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ, ТИПИЧНЫХ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**В.А. Косяков<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, [asenya777@yandex.ru](mailto:asenya777@yandex.ru)

*Исследование гибридных ракетных двигателей в эпоху орбитальных и суборбитальных полетов стало актуально как никогда. Такой тип двигателя имеет ряд преимуществ перед жидкостными ракетными двигателями и твердотопливными ракетными двигателями. Главным же недостатком таких*



двигателей является невысокий удельный импульс тяги. В качестве перспективного пути решения этой проблемы было предложено использовать легкоплавкие топлива с низкой вязкостью, с поверхности которых происходит отрыв и унос капель. В данной работе рассмотрен вопрос влияния жидких капель топлива на процессы горения диффузионного пламени в пограничном слое высокоскоростного потока окислителя. В результате численного моделирования были получены двумерные распределения макроскопических характеристик при различных параметрах капель. С увеличением диаметра капель доля испарившихся капель падает. В зависимости от положения капли и ее размера уменьшается локальная температура вблизи нее в диапазоне от  $\approx 50$  К до  $\approx 700$  К.

*The study of hybrid rocket engines in the era of orbital and suborbital flights has become more relevant than ever. This type of engine has several advantages over liquid propellant rocket engines and solid propellant rocket engines. The main disadvantage of such engines is their low specific thrust impulse. As a promising way to solve this problem, it was proposed to use low-melting fuels with low viscosity, from the surface of which drops are detached and carried away. In this work, the question of the influence of liquid fuel droplets on the combustion of a diffusion flame in the boundary layer of a high-speed oxidizer flow is considered. As a result of numerical simulation, two-dimensional distributions of macroscopic characteristics were obtained for various droplet parameters. With an increase in the droplet diameter, the fraction of evaporated droplets decreases. Depending on the position of the droplet and its size, the local temperature near it decreases in the range from  $\approx 50$  K to  $\approx 700$  K.*

Как правило в космических аппаратах в качестве силовой установки используются жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) или твердотопливные ракетные двигатели (РДТТ). Помимо ЖРД и РДТТ значительный интерес представляют гибридные ракетные двигатели, например с газообразным окислителем и твердым горючем. Их основными достоинствами являются: относительная простота, отсутствие проблемы возможных утечек токсичного топлива, низкая пожароопасность, возможность долговременного хранения. Главным же недостатком таких двигателей является невысокий удельный импульс тяги. В качестве перспективного пути решения этой проблемы было предложено использовать легкоплавкие топлива с низкой вязкостью [1]. При их плавлении на поверхности твердотопливного образца формируется тонкий жидкий слой, с которого происходит отрыв и унос капель высокоскоростным потоком окислителя. Капли, вовлеченные в поток окислителя, впоследствии полностью или частично испаряются и сгорают во фронте пламени. Благодаря этому возрастает величина уноса топлива и, следовательно, удельный импульс тяги. В тоже время, вопрос влияния жидких капель топлива на процессы горения диффузионного

пламени в пограничном слое высокоскоростного потока окислителя остается открытым.

В настоящей работе в качестве топлива был выбран н-додекан, минимальный нормальный алкан, упоминаемый в литературе [2], как горючее для гибридного ракетного двигателя.

На рис. 1 показана схема исследуемой модельной камеры сгорания.

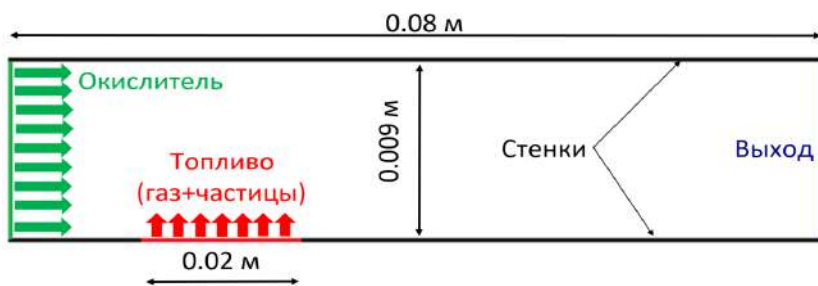


Рис. 1 – Схема модельной камеры сгорания

Слева в камеру сгорания подается кислород, снизу н-додекан ( $C_{12}H_{26}$ ) в виде газа и частиц жидкого топлива. Численное моделирование проводилось с помощью программного пакета OpenFOAM. В ходе численного моделирования варьировались скорости потока окислителя и топлива в диапазонах  $V_{\text{окислитель}}=5, \dots, 30$  м/с,  $V_{\text{топливо}}=0.001, \dots, 0.05$  м/с, количественная концентрация капель топлива составляла  $v_{\text{капель}}=50, \dots, 50000$  1/с, а их размер  $\Delta=50, 100, 150, 200$  мкм. Следует отметить, что в рамках полной постановки задача является сопряженной. А именно, поток продуктов газификации и пиролиза твердого топлива с поверхности образца, а также количество и размер капель зависят от потока тепла на поверхности твердого топлива. Этот поток зависит от характеристик процесса горения диффузионного пламени, которые, в свою очередь зависят от расхода газообразного и жидкого топлива. В численном моделировании использовалось упрощение, при котором считается, что количество капель и расход газообразного топлива заданы. Также предполагается, что все капли имеют сферическую форму и их размер одинаков.

Результаты численных исследований показали, что с добавлением капель в систему, меняется температура и положение фронта пламени, полнота сгорания и удельный импульс тяги. Так на рис. 2 показана доля испарившихся капель жидкого топлива в зависимости от соотношения массового расхода капель к массовому расходу газообразного топлива.

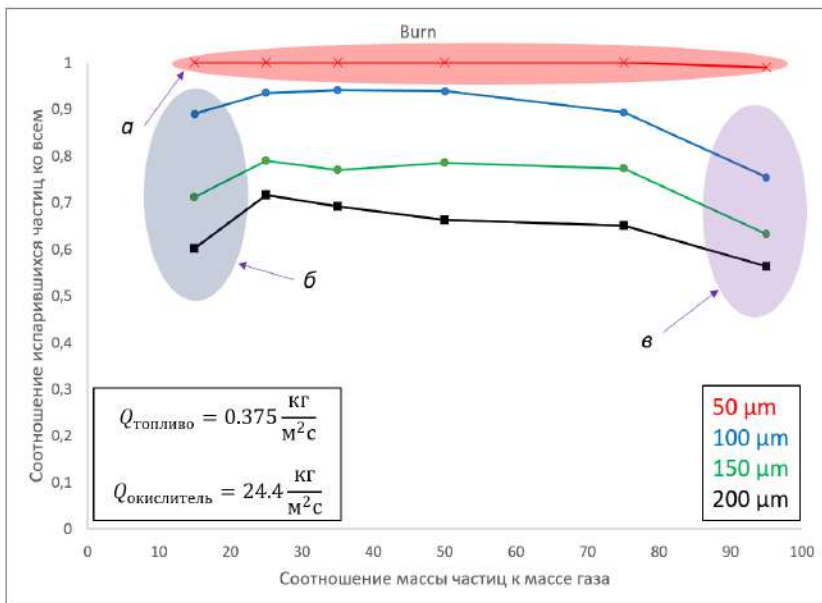


Рис. 2 – Влияние диаметра капли на зависимость доли испарившихся капель от относительной массы частиц

На графике по оси абсцисс отложено соотношение массы капель к массе газового топлива, при этом полный расход топлива поддерживается постоянным. Отметим, что начальная скорость частиц равна нулю, однако в процессе вовлечения капель в поток окислителя они приобретают скорость, значение которой в значительной степени зависит от скорости потока газообразного топлива. Следовательно, чем меньше соотношение массового расхода капель к массовому расходу газообразного топлива, тем больше скорость капель. Если это соотношение равно нулю, подается чистый газ, с увеличением соотношения добавляется больше капель и уменьшается подача газа. По оси ординат отложено соотношение испарившихся частиц ко всем добавленным. На графике показано, что при размере капель 50 мкм все добавленные капли испаряются, переходя в газовую фазу. С увеличением размера капель доля испарившихся капель уменьшается, и график зависимости на рис. 2 приобретает вид перевернутой параболы. Это обусловлено тем, что при малом соотношении массовых расходов частиц к газу на графике скорость истечения газового топлива с каплями наибольшая, поэтому часть капель покидает систему, не испарившись полностью. Справа скорость подачи газового топлива с каплями

наименьшая, поэтому частицы летят по низу камеры сгорания вблизи стенки. Доля испарившихся капель уменьшается, потому что вблизи стенки температура меньше чем в фронте пламени.

На рис. 3 показаны двумерные распределения температуры для вышеперечисленных случаев.

На рис.3(а) показано, что частицы размером 50 мкм не долетают до конца камеры сгорания, испаряясь полностью. Попадая во фронт пламени, капли топлива малого размера незначительно влияют на его характеристики.

На рис.3(б) в конце камеры сгорания частица с изначальным размером 200 мкм испарилась до 160 мкм. Оставшаяся часть вылетела из камеры, не сгорев, это произошло из-за большого значения скорости подачи газового топлива. Также заметно локальное уменьшение температуры вблизи капли до  $\approx 700\text{K}$ , это тепло затрачивается на испарение частицы. Капли, летящие вблизи стенки, заметно меньше влияют на характеристики пламени.

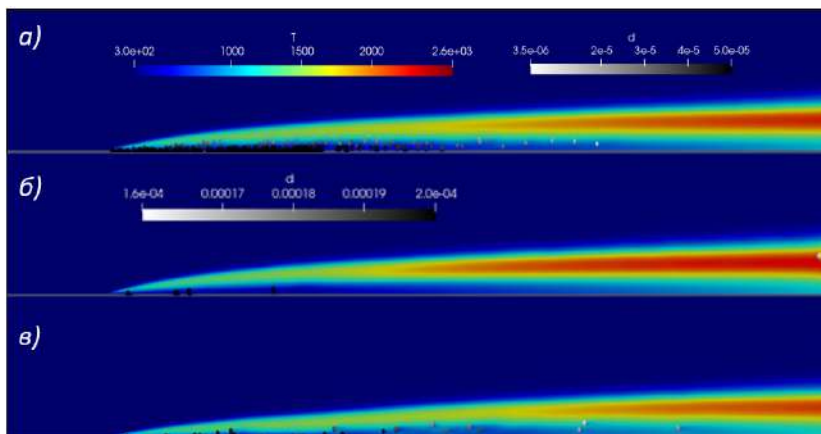


Рис. 3 – Примеры расчетов: а –  $\Delta = 50$  мкм,  $V_{\text{топливо}} = 0.01$  м/с, б –  $\Delta = 200$  мкм,  $V_{\text{топливо}} = 0.05$  м/с, в –  $\Delta = 150$  мкм,  $V_{\text{топливо}} = 0.001$  м/с

**Заключение.** Таким образом, показано влияние капель на процессы горения диффузионного пламени в пограничном слое высокоскоростного потока окислителя в модельной камере сгорания. Доля испарившихся капель размером 50 мкм равна количеству добавленных капель. С увеличением диаметра капель доля испарившихся капель падает. В зависимости от положения капли и ее размера уменьшается локальная температура вблизи нее в диапазоне от

$\approx 50$  К до  $\approx 700$  К. Также было получено, что удельный импульс тяги увеличивается с добавлением капель. Этот результат качественно совпадает с результатами экспериментов статьи [3].

Работа написана под руководством доктора физико-математических наук Фурсенко Р.В.

Литература:

1. Giuseppe Leccese, Daniele Bianchi, Francesco Nasuti., “Modeling and Simulation of Paraffin–Based Hybrid Rocket Internal Ballistics”, AIAA Propulsion and Energy 2018.
2. L. Galfetti, et.al., Progress in Propulsion Physics 4 (2013) 59-74
3. Giuseppe Leccese, Enrico Cavallini, Marco Pizzarelli., “State of Art and Current Challenges of the Paraffin–Based Hybrid Rocket Technology”, AIAA Propulsion and Energy 2019.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ СРЕДЫ НА УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**А.К. Кравченко, Е.И. Краус**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск,  
e-mail: akravchenko@itam.nsc.ru**

**Научный руководитель: Краус Е.И., к.ф.-м. н.**

*В данной работе моделируется ударное взаимодействие для определения параметров неоднородной среды и проводится сравнение, при разной объемной концентрации цинка в обеих математических моделях гетерогенного материала.*

*In this paper, the impact interaction is modeled to determine the parameters of a heterogeneous medium. A comparison is made, at different volume concentrations of zinc in both mathematical models of heterogeneous material.*

Актуальность гетерогенных материалов в наше время заключается в том, что сплавы цинка с алюминием имеют сравнительно высокие механические и литейные свойства.

Гетерогенные материалы не являются чем-то нерассмотренным в наше время. Способов построения таких моделей существует множество [1]. Так же не является новым и вопрос скоростного взаимодействия ударника и преграды.

Многофазной, или гетерогенной, средой называется среда с разнородными включениями [2]. В многокомпонентной системе фазы могут иметь различный состав и структуру.

Была поставлена задача о скоростном взаимодействии двух тел: гомогенного ударника из алюминия и композитной преграды из алюминия в основании и цинковых включений. В начальный момент времени гомогенное тело с заданной скоростью взаимодействует с гетерогенной преградой. Композитный материал рассматривается с разной объемной долей цинка. Для описания гетерогенного тела были использованы математические модели: прямое численное моделирование и аддитивная модель. После взаимодействия первое тело передает второму импульс, возбуждающий распространение ударной волны в сторону направления скорости.

Цель работы: определить параметры неоднородной среды и провести сравнение при разной объемной концентрации цинка в обеих математических моделях гетерогенного материала.

Для реализации цели работы задача была рассмотрена в одномерной и двумерной постановках [3]. Одномерная постановка задачи описана авторским кодом на языке Fortran. Двумерная постановка реализована в программном комплексе «Reactor 3D» [4].

Из серии расчетов были получены значения скорости ударной волны в среде от массовой скорости частиц, при разной объемной концентрации. Что позволило получить значения коэффициентов уравнения состояния на основе соотношения Ренкина-Гюгонио. Проведено сравнение для обеих математических моделей, которое показало отклонение от теоретических значений до 15%. Также исследованы такие параметры, как предел текучести, продольная и поперечная скорости звука, модуль сдвига и модуль всестороннего сжатия.

#### Литература:

1. Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Учет электронных составляющих в уравнении состояния при расчете ударных волн в смеси металлов // Математическое моделирование систем и процессов. 2001. Vol. 9. P. 73–84.
2. Eremeyev V.A., Editors L.A.I. Multiscale Solid Mechanics. 2021. Vol. 141.
3. Wilkins M.L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. 1999. P. 243.
4. Kraus E.I., Shabalin I.I. Reactor2D: A tool for simulation of shock deformation // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1770. P. 030092.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДЪЕМНОЙ ЯЧЕЙКИ МУЛЬТИРОТОРНОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ

**В.В. Куликов**

**Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, [asmodey3598@yandex.ru](mailto:asmodey3598@yandex.ru)  
Научный руководитель: к.т.н., доцент А.В. Крюков**

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

*This article discusses the methodology for assessing the thrust created by the propeller and the inlet confuser, provides the main solutions for finding the optimum between the confuser size and its weight, and also considers the main phenomena that reduce the thrust and methods of dealing with them. Various confuser configurations and their advantages and disadvantages are analyzed.*

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, которые имеют свои преимущества и недостатки. В основной своей части, это легкие беспилотные и дистанционно управляемые летательные аппараты, предназначенные для наблюдения, аэрофотосъемки, доставки легких малогабаритных грузов и развлекательных целей.

В данном исследовании рассматривается ячейка мультироторной платформы и способы повышения ее эффективности с помощью увеличения статической тяги. Тяга данных платформ ограничена мощностью двигателей, 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 разрежение [1], создающее дополнительную подъемную силу. Кроме того добавление конфузора позволит помимо создания дополнительной тяги защитить винты от попадания в них предметов, которые могут привести к разрушению платформы. Помимо прочего, для исключения влияния реактивного момента вращения в данном исследовании будут рассматриваться винты соосного вращения. Существует ряд работ, в которых исследовалась аэродинамика и взаимовлияния винтов соосного вращения [2-3].

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 конфузоров (рис. 1), создаваемый ими прирост как на теоретической основе, так и в практическом исследовании.

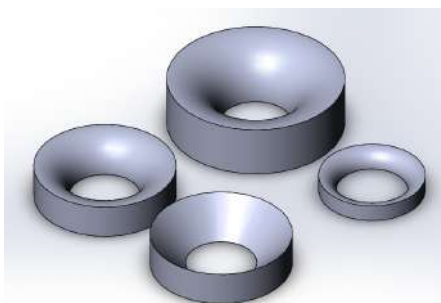


Рис. 1 – Модели конфузоров

Прирост тяги определяется как отношение суммарной силы, создаваемой конфузором, к силе, создаваемой винтами отбрасывающими воздух:

$$\Delta = \frac{F_{\Sigma i}}{F_k} \cdot 100\%.$$

Сила, с которой винт отбрасывает воздух была установлена из теории активного диска:

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

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

Из теоремы Эйлера об изменении кинетической энергии была определена скорость воздуха за винтами [4]:

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

где  $F_{\Sigma i}$  – прирост силы, создаваемый конфузором;  $S_k$  и  $v_k$  – площадь и скорость в самой узкой части конфузора соответственно;  $F_k$  –



тяги, создаваемая винтами;  $\Delta S$  — площадь кольца действия силы;  $\gamma$  — угол между проекциями компонент статического давления;  $\eta$  и  $N_{\text{мех.}}$  — КПД винта и механическая мощность соответственно.

Таким образом, в теоретической модели рассматриваются только вертикальные компоненты силы, что значительно упрощает расчет (рис. 2).

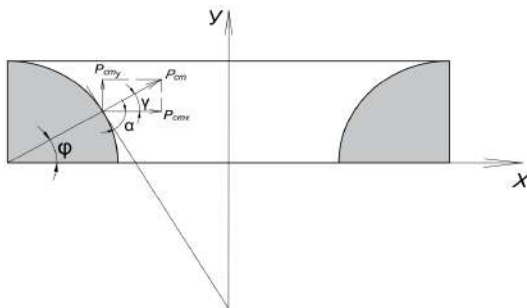


Рис. 2 – Действие статического давления на поверхность конфузора

Результаты расчета по данной математической модели сведены в Таблицу 1. Как видно из таблицы, с ростом размера конфузора, растет и прирост тяги, создаваемой конфузуром.

Из результатов, представленных в Таблице 1, видно, что прирост тяги непропорциональный, для разных конфузуров. 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.

**Таблица 1 – Сравнение результатов**

Модель	Теоретические оценки, [%]	Экспериментальные результаты	
		первого этапа, [%]	второго этапа, [%]
Тороидальный, радиус образующей 0,5r	11,5	6,5	-
Тороидальный, радиус образующей 1r	15,5	7,5	26,7
Тороидальный, радиус образующей 1,5r	17,0	8,3	-
Конический с шириной основания 115 мм	19,0	5,3	15,5

Как видно из второго этапа экспериментов, где использовался оболочковый конфузор, донное давление существенно влияет на показания тяги.

Был проведен ряд экспериментов подтвердивших предположение о картине изолиний (рис 3).

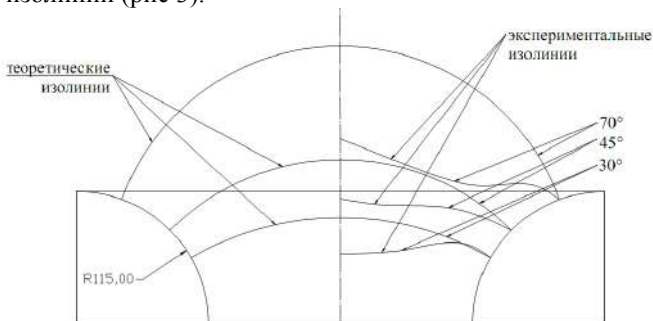


Рис. 3 — Теоретическая и практическая картина изолиний давления

По результатам проведенных экспериментов было установлено распределение давления по поверхности конфузора (рис. 4).

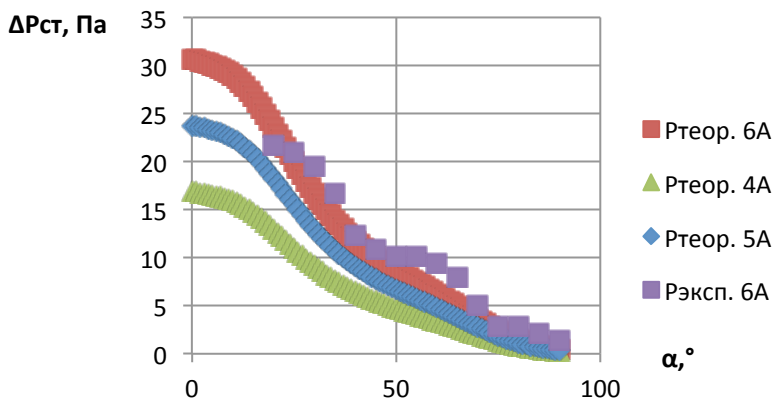
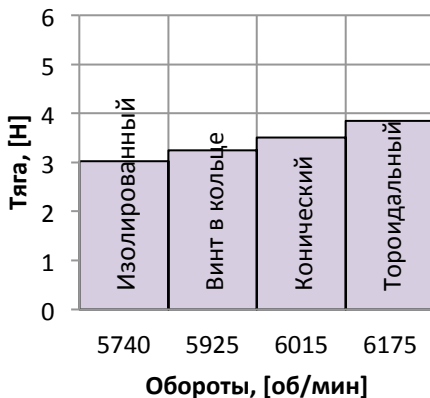


Рис. 4 – Диапазон распределений давлений для разных значений тока

Стоит отметить, что помимо тяги, создаваемой за счет разрежения на поверхности конфузора, также большой вклад в суммарную тягу вносит прирост оборотов, возникающий при помещении винтов в конфузор или

кольцо (рис 5). Зависимость повышения оборотов линейна и, например, для конфузора тороидального среднего размера составляет 7,5%, что сопоставимо с 4-процентным ростом тяги.

**Зависимость тяги от оборотов на  
6 А**



**Зависимость тяги от оборотов на 10  
А**

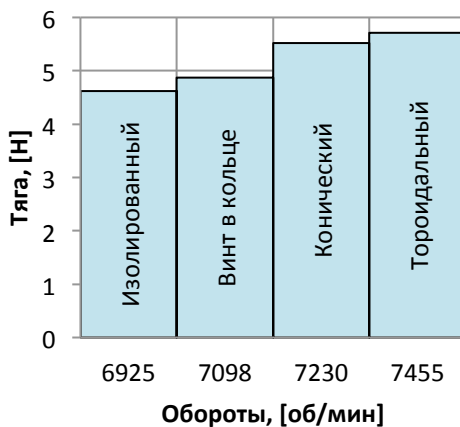


Рис. 5. – Картина повышения оборотов в зависимости от задаваемой силы тока и типа конфузоров

Таким образом, по проведенным экспериментам были установлены все факторы, влияющие на тягу создаваемую винтомоторной группой, помещенной в конфузор, что позволит в дальнейшем найти конструктивный оптимум при создании полномасштабной модели подъемной мультироторной платформы.

Литература:

1. Остроухов С. П., Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей: - М.: Физматлит, 2014. – 328 с
2. Geldenhuys H. J., Aerodynamic development of a contra-rotating shrouded rotor system for a UAV. — 2015. – 92с
3. Chao Huoі, 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
4. Обуховский А.Д., Аэродинамика воздушного винта. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 80с

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ПОТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОГО ВИНТА КВАДРОКОПТЕРА**

**В.В. Маркин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
Институт Теоретической и Прикладной Механики  
им. С.А. Христиановича, г. Новосибирск, mvv\_pvl@mail.ru  
Научный руководитель П.А. Поливанов, к.ф.-м.н.**

*Винт квадрокоптера при прямолинейном горизонтальном полете работает в режиме косої обдувки [1]. Течение около лопасти винта малогабаритного квадрокоптера соответствует низким числам Рейнольдса  $Re = (10-70) \cdot 10^3$ . Эти числа Рейнольдса характеризуются наличием существенного ламинарного участка, протяженность которого зависит от уровня набегающих возмущений. В проведенных экспериментах дана оценка влияния турбулентности потока на характеристики работы винта малогабаритного квадрокоптера.*

*During horizontal flight the propellers of quadcopter is operate in the oblique blowing mode [1]. The flow near the rotor blade of a small-sized quadcopter corresponds to low Reynolds numbers  $Re = (10-70) \cdot 10^3$ . These Reynolds numbers are characterized by the presence of a significant laminar section, the length of which depends on the level of incident disturbances. On the basis of experimental data, an assessment of the influence of flow turbulence on the small-sized quadcopter propeller characteristics was given.*

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния пульсаций скорости потока на характеристики воздушного винта квадрокоптера.

Эксперимент проводился в дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ с квадратной рабочей частью сечением 1x1 м, длиной 4 м. Турбулизация потока производилась при помощи установки турбулизирующих сеток на входе в рабочую часть трубы (рис. 1а). Уровень пульсаций измерялся термоанемометром ТПС ИТПМ, и составлял от 0.04% (без турбулизирующей сетки) до 1.7%. Скорость потока варьировалась в пределах от  $V_0=5$  м/с до  $V_0=15$  м/с. Контроль и измерение параметров работы винта осуществлялись при помощи тензометрического стенда RCbechmark 1585 (рис. 1б). Стенд позволяет записывать данные о тяге, реактивном моменте, оборотах, текущем угле установки винта, параметры работы электродвигателя и скорость набегающего потока. Измерения проводились в диапазоне оборотов винта от 0 об/мин до 14000 об/мин, при углах обдувки от  $\theta=0^\circ$  (осевая обдувка) до  $\theta=90^\circ$  (косая обдувка) (рис. 1в). Использовался винт Gemfan 7042R диаметром 178 мм.

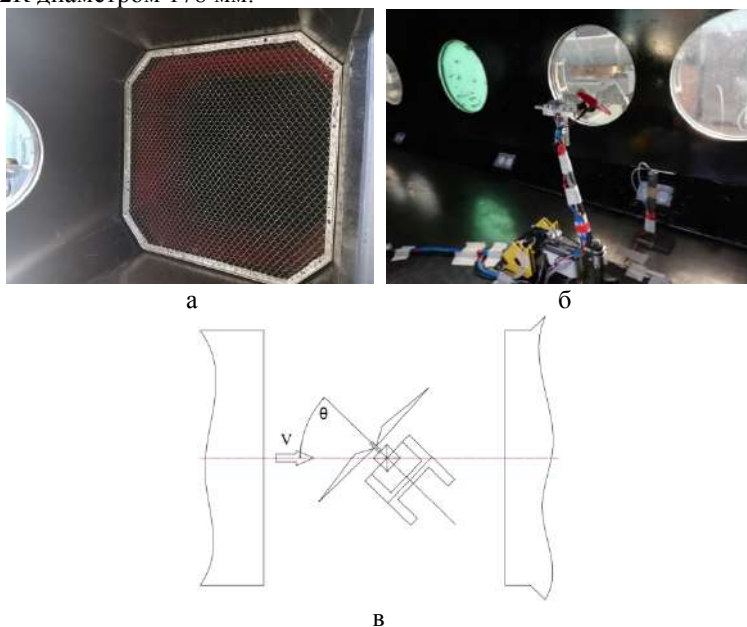


Рис. 1 – Фрагменты экспериментальной установки: а – турбулизирующая сетка на входе в рабочую часть трубы, б – стенд в рабочей части а/д трубы Т-324, в – схема эксперимента

На основании совместного решения уравнений теории идеального винта и теории изолированного элемента лопасти [2] качественно получены величины углов атаки лопастей, работающих при осевой и косо́й обдувке. Характеристики профиля лопасти были получены численно, панельным методом с учетом влияния пограничного слоя. В расчетах положение ламинарно-турбулентного перехода определялось с использованием  $eN$  метода. Было обнаружено, что изменение уровня внешних возмущений может приводит к изменению характеристик винта. Так изменение коэффициента  $N$  от 1 до 9 (падение пульсаций) приводило к росту  $C_{y\max}$  профиля в 1,2 раза. Дальнейший рост коэффициента  $N$  не приводил к существенному изменению характеристик лопасти.

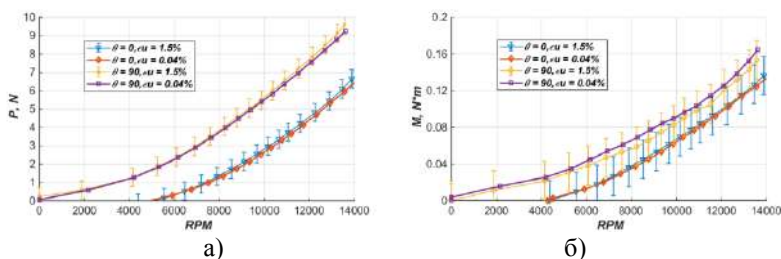


Рис. 2 – а) зависимость тяги винта об оборотов, б) зависимость реактивного момента винта от оборотов, при  $V_0=15\text{м/с}$

На рис. 2 представлены графики зависимостей параметров работы винта от числа его оборотов в минуту. Цвет кривой соответствует комбинации угла установки  $\theta$  и величине пульсаций скорости в потоке  $eN$ .

Видно, что повышение уровня пульсаций в потоке в 10 раз практически не повлияло на характеристики винта. Кривые тяги и момента для одного  $\theta$  и различных  $eN$  лежат в пределах доверительного интервала измерительного оборудования. Выше было показано, что отсутствие влияние внешних набегающих пульсаций на характеристики винта возможно только при больших величинах коэффициента  $N$ , что обычно соответствует возмущениям существенно ниже величин демонстрируемых на графике. Это можно объяснить тем фактом, что величина пульсаций демонстрируемая на графиках получена во всем частотном диапазоне измерений термоанемометра.

Показано, что реализованные в эксперименте параметры турбулентности не оказывают влияния на характеристики винта

квадрокоптера. Эффекта не наблюдается на режимах как осевой, так и косой обдувки.

Литература:

1. Polivanov P.A., Sidorenko A.A. Quadcopter propeller characteristics in the oblique flow // Journal of Physics: Conference Series : XVI All-Russian Seminar with international participation "Dynamics of Multiphase Media" (Novosibirsk, 30 Sept. - 5 Oct. 2019). Vol.1404. -S.l.: IOP Publishing, 2019. - 012095(5)

2. Обуховский А.Д. Аэродинамика воздушного винта – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 80 с.

## **ДИНАМИКА КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗЯДОВ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**И.А. Маслобоев<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, г. Новосибирск, hawkeye90@yandex.ru**

*Исследование комбинированных разрядов происходило с использованием модели пластины с установленным блоком электродов и магнитом. Для создания скользящего поверхностного разряда использовалась система электродов, состоящая из двух узких длинных электродов и подложки, соединенной с одним из электродов, а также была предложена схема скользящего разряда с многосекционным катодом. В ходе экспериментальных исследований были реализованы комбинированные импульсные разряды, поддерживаемые серией коротких ВЧ импульсов тока с характерным временем импульса менее 1 мкс. Скорость разрядов составляла от 40 до 160 м/с в зависимости от условий эксперимента.*

*The study of combined discharges was carried out using a plate model with an installed block of electrodes and a magnet. To create a sliding surface discharge, a system of electrodes was used, which consisted of two narrow long electrodes and a substrate connected to one of the electrodes, and a scheme of a sliding discharge with a multisection cathode was proposed. In the course of experimental studies, combined pulsed discharges were implemented, supported by a series of short high-frequency current pulses with a characteristic pulse time of less than 1  $\mu$ s. The discharge rate ranged from 40 to 160 m / s, depending on the experimental conditions.*

Исследование комбинированных разрядов происходило с использованием модели пластины с установленным блоком электродов и магнитом. Пластина помещалась в камере низкого давления. Необходимое давление рабочего газа устанавливалось с помощью вакуумного насоса. Подача электрических импульсов на электроды происходила параллельно от импульсного высокочастотного генератора тока (изготовлен в ИФП СО РАН), и тока разряда батареи конденсаторов. Такой разряд можно отнести к комбинированному разряду. Организация электрических разрядов была реализована по схеме распределенного скользящего разряда, который может быть рассмотрен в качестве перспективного метода ионизации потока в тонком пристеночном слое.

Для создания скользящего поверхностного разряда использовалась система электродов, состоящая из двух узких длинных электродов и подложки, соединенной с одним из электродов. Узкие электроды и подложка располагались по разные стороны тонкой диэлектрической пластины (рис. 1). Длина и ширина узких электродов составила 80 и 3 мм соответственно. Расстояние между электродами 53 мм. Площадь

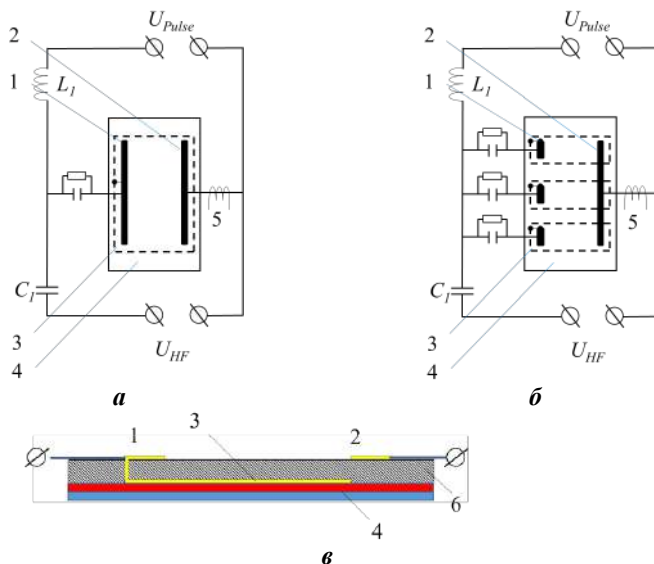


Рис. 1 – Электрические схемы реализации распределенного скользящего разряда между двух электродов (а) и разряда с трехсекционным электродом (б), а также схема расположения электродов, подложки и магнита относительно поверхности (в): 1 – катод, 2 – анод, 3 – подложка катода, 4 – магнит, 5 – трансформатор тока, 6 – диэлектрик



подложки соответствовала площади межэлектродного пространства. Таким образом, при подаче высоковольтного импульса напряжения на анод 2 на поверхности диэлектрика формировалась система каналов скользящего разряда. В зависимости от параметров эксперимента наблюдались как незавершенная форма скользящего разряда, так и завершенная. Магнитное поле вблизи поверхности создавалось постоянным редкоземельным магнитом, расположенным под подложкой и отделенным от нее тонкой диэлектрической пластиной. Направление вектора магнитного поля было нормально поверхности, т.е. перпендикулярно вектору напряженности электрического поля. В результате при каждом импульсе тока в магнитном поле возникала электромагнитная сила, направленная вдоль поверхности.

В ходе экспериментальных исследований были реализованы комбинированные импульсные разряды, поддерживаемые серией коротких ВЧ импульсов тока с характерным временем импульса менее 1 мкс.

На рис. 2 представлены кадры видеосъемки процесса горения разряда в магнитном поле при давлении воздуха 55 Торр. Напряжение на конденсаторах составило 2 кВ, напряжение ВЧ генератора было 3,5 кВ при частоте следований импульсов 15,7 кГц, продолжительность пакета ВЧ импульсов составляла 890 мкс. Длительность тока разряда конденсаторов составляла около 2000 мкс. В момент подачи первого импульса от ВЧ-генератора между электродами возникает область распределенного скользящего разряда типа «плазменный лист». В отсутствие магнитного поля данная область отличается равномерным свечением плазмы во всем разрядном промежутке. Скорость разряда составляла от 40 до 160 м/с в зависимости от условий эксперимента.

Для создания нескольких зон возникновения дуговых разрядов, с целью их равномерного распределения по поверхности, была предложена схема скользящего разряда с многосекционным катодом (рис. 3).

С целью нахождения оптимальных способов ионизации газа вблизи поверхности пластины были реализованы комбинированные поверхностные распределенные разряды, поддерживаемые высокочастотными импульсами тока. Показано, что в магнитном поле 0.2 Тл разряды движутся со скоростью до 160 м/с при суммарном токе 3–10 А, что может быть использовано для эффективного влияния на структуру течения вблизи поверхности при давлении воздуха около 6–7 кПа. Использование многосекционного катода позволило создать каскад дуговых разрядов, что может быть использовано для равномерного распределения зон влияния газоразрядной плазмы на пристеночный слой газа.

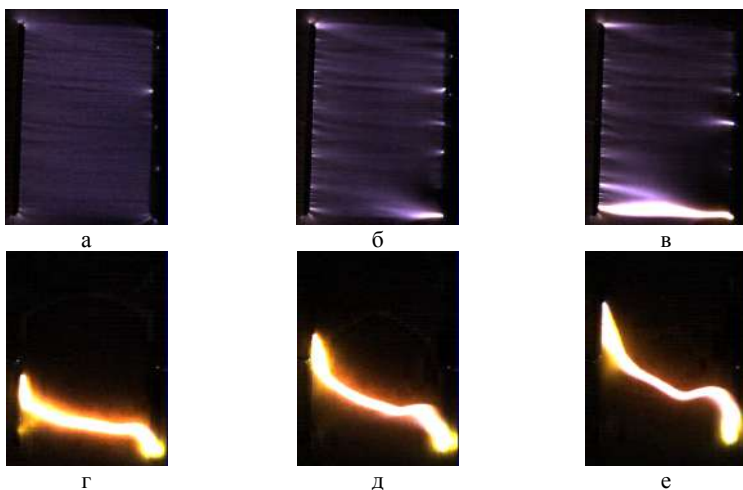


Рис. 2 – Эволюция комбинированного импульсно-периодического скользящего разряда 15,7 кГц в магнитном поле 0,2 Тл после инициации через: а – 1 мкс, б – 175 мкс, в – 349 мкс, г – 524 мкс, д – 698, е – 872 мкс

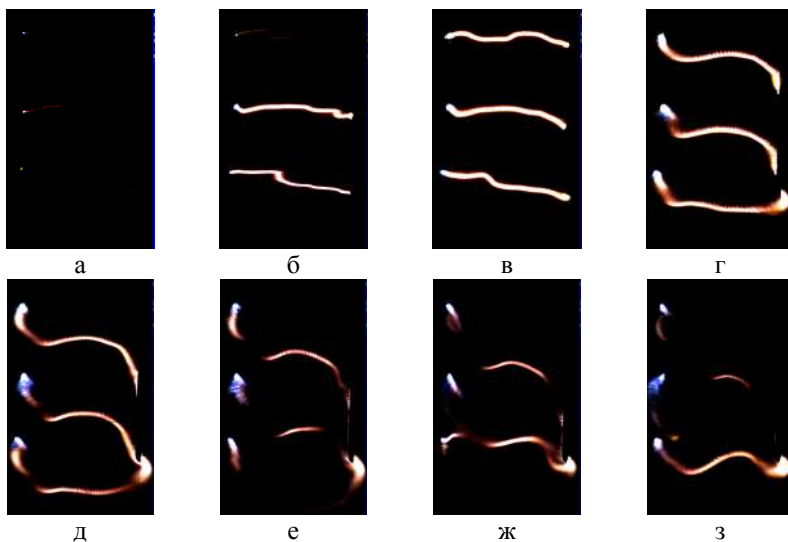


Рис. 3 – Эволюция комбинированного импульсно-периодического разряда 29 кГц с трехсекционным катодом в магнитном поле 0,2 Тл после инициации через: а – 1 мкс, б – 34 мкс, в – 51 мкс, г – 68 мкс, д – 268 мкс, е – 384 мкс, ж – 551 мкс, з – 684 мкс

Работа выполнена под руководством доктора физико-математических наук Фомичева В.П.

Литература:

1. L. Kimmel, Roger & R. Hayes, James & Menart, James & Shang, J. (2006). Effect of Magnetic Fields on Surface Plasma Discharges at Mach 5. Journal of Spacecraft and Rockets, Issue 43, p. 1340-1346.
2. R. Jousot, S. Coumar, V. Lago. Plasmas for High Speed Flow Control. AerospaceLab, 2015.
3. Nishihara, Munetake & Jiang, Naibo & Rich, J & Lempert, Walter & V. Adamovich, Igor & Gogineni, Sivaram. (2005). Low-Temperature Supersonic Boundary Layer Control Using Repetitively Pulsed MHD Forcing. Physics of Fluids. 17.

## **РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ДИСКРЕТНОЙ СРЕДЕ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ СФЕР В ОДНОМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

**Е.А. Мельник**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [linkinpark1999oi@mail.ru](mailto:linkinpark1999oi@mail.ru)  
Научный руководитель: Краус Е.И., к.ф.-м.н.**

*В данной работе с помощью численных методов приводится исследование распространения одномерных волн в гранулированной среде, представленной набором сферических оболочек. Дается анализ полученных результатов и их сравнение с результатами эксперимента.*

*This paper uses numerical methods to study the propagation of one-dimensional waves in a granular medium represented by a set of spherical shells. The analysis of the obtained results and their comparison with the results of the experiment are given.*

Исследование распространения ударных волн в дискретных средах представляет технический и теоретический интерес. Часто требуется понимать характер протекания волновых процессов в таких средах при решении ряда прикладных задач теории упругости, акустики, оптики, радиофизики, механики композитов и т.д. Знания о распространении волн при воздействии на зернистые среды дает возможность, например, правильно рассчитать давления при прессовании порошков, учесть рассеивание энергии при разрушении материалов до фрагментов.



$$f = f_p + f_s = k_0 dx, \quad k_0 = (2\pi R P_G + 4\pi G D_W)$$

$$P_G = P_o - P_v$$

Приняты следующие обозначения:  $x_{ci}$  – изменение координат центра масс частиц,  $v_{ci}$  – скорость,  $a_{ci}$  – ускорение, вызванное восстанавливающей силой  $f_i$ ,  $f_p$  – сила, возникающая от избыточного давления,  $f_s$  – сила, возникающая из-за деформации сдвига,  $R$  – радиус сферы,  $P_G$  – манометрическое давление,  $P_o$  – давление внутри сферы,  $P_v$  – давление вне сферы,  $G$  – модуль сдвига,  $D_W$  – толщина оболочки сферы,  $dx$  – величина деформации,  $N$  – количество частиц.

Ударное поведение часто характеризуется коэффициентом восстановления, который является мерой энергии, рассеянной при столкновении. Этот коэффициент равен отношению модуля скорости в конце удара о неподвижную преграду к модулю скорости в начале удара

$$e = \frac{|v'|}{|v|}$$

Очевидно, что его значение, которое должно лежать между 0 и 1, зависит от характера удара и, в частности, от физических характеристик тела. Если рассматривается абсолютно упругий удар, то этот коэффициент равен 1.

В работе [1] приводится результат лабораторного эксперимента, в ходе которого были использованы три различных типа надувных мячей. В данном случае присутствует диссипация энергии. Диссипативная сила больше, когда шар падает с большей высоты, поскольку площадь деформации шара больше, кроме этого при более высоких манометрических давлениях величина и продолжительность сжатия шара ниже, что приводит к меньшему рассеянию энергии.

Таким образом, при решении задачи, соответствующей реальным условиям, необходимо учитывать наличие диссипативных сил. Для этого был использован инженерный подход к представлению соударения сферы с твердой поверхностью (см. рис. 2).

При расчете ускорения по формуле (1) необходимо учитывать член, отвечающий за диссипацию. Учитывая это, получим уравнение:

$$m \frac{\partial^2 x_c}{\partial t^2} + k_1 \frac{\partial x_c}{\partial t} + k_0 dx = 0$$

$$k_1 = 2mu_0 \text{Ln}(e), \quad dx = \sin(u_0 t) \exp(-\lambda t), \quad \lambda = k_1 / (\pi m)$$

Здесь  $k_1$  – коэффициент демпфирования.

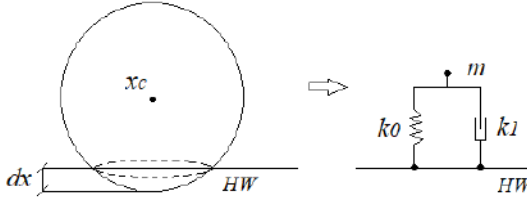


Рис. 2 – Инженерный подход к решению поставленной задачи

Решив данное уравнение аналитически получим график зависимости скорости от времени. Из рис. 3 видно, что скорость сферы в момент отскока от стенки меньше скорости соударения.

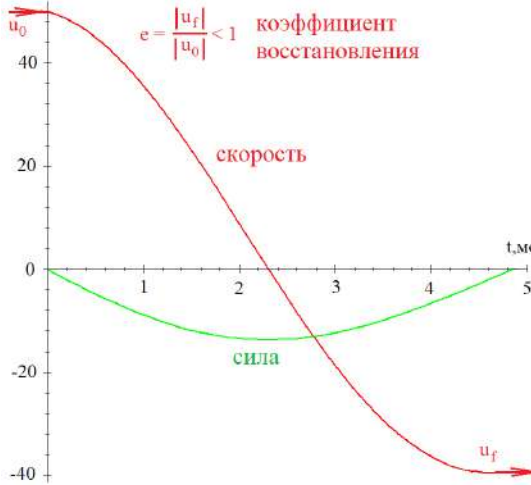


Рис. 3 – Скорость центра масс сферы с учетом диссипации

С учетом приведенных выше формул также была решена задача о распространении ударной волны в цепочке сфер, заполненных воздухом. Из графика ниже видно, что частицы вблизи поршня достигают стационарного состояния, а скорость частиц на фронте ударной волны максимальна.

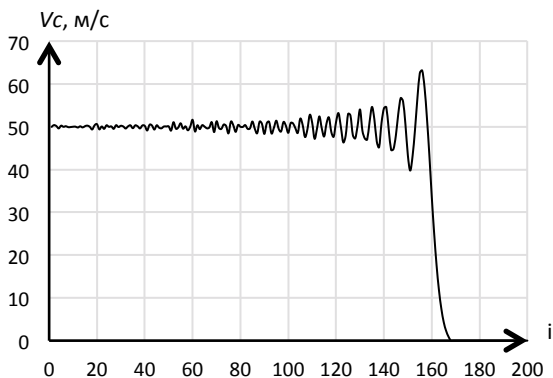


Рис. 4 – Профиль скорости в цепочке полых сфер

Литература:

1. *H Li, L.J., Li, X.L., Zhou, ZK. et al.*: Simulation on propagation characteristics of solitary waves in a one-dimensional charged granular chain. *Granular. Matter* 21, 46 (2019).
2. *Рихтмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач: Пер. с англ. – М., 1972. 420 с.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. – М.: Наука, 1965. – 160 с.

## ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ВТОРОЙ МОДЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

У.В. Михайлова

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [ulyana.mikhaylova.99@mail.ru](mailto:ulyana.mikhaylova.99@mail.ru)

Научный руководитель: Кудрявцев А. Н., д.ф.-м.н., старший  
научный сотрудник

*В работе проводится прямое численное моделирование развития возмущений второй моды в сверхзвуковом пограничном слое над пластиной при числе Маха  $M = 6$  и числе Рейнольдса, рассчитанном по толщине пограничного слоя,  $Re = 1000$ . Получены собственные функции возмущений пограничного слоя с максимальным коэффициентом роста. Выполнено сравнение результатов, полученных путем прямого численного моделирования и в рамках*

*линейной теории устойчивости. Визуализированы поля возмущений давления, плотности и скорости в различные моменты времени.*

*The paper presents a direct numerical simulation of the development of second mode disturbances in a supersonic boundary layer above the plate at Mach number  $M = 6$  and Reynolds number calculated from the thickness of the boundary layer,  $Re = 1000$ . The eigenfunctions of the boundary layer perturbations with the maximum growth coefficient are obtained. The results obtained by direct numerical simulation and in the framework of linear stability theory are compared. The fields of pressure, density and velocity perturbations at different time points are visualized.*

В наши дни все больше внимания уделяется разработке перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. В связи с этим, важнейшей задачей, требующей решения, является значительное увеличение теплопередачи и трения воздуха об обшивку в случае раннего перехода пограничного слоя из ламинарного состояния в турбулентное. Гиперзвуковые летательные аппараты должны быть способны стабилизировать пограничный слой и увеличивать область ламинарного режима обтекания. В качестве одного из способов гашения возмущений могут применяться поглощающие ультразвук пористые покрытия: внутри них возбуждается звуковая волна, которая гасится за счет вязкости и в результате отнимает энергию у основного течения. Эффективность данного метода была доказана в теоретических [1] и экспериментальных [2] исследованиях. Единственным способом расчета развития неустойчивостей в гиперзвуковых пограничных слоях на поздних, нелинейных, стадиях является прямое численное моделирование. На ранних стадиях успешно применяется линейная теория устойчивости.

В проделанной ранее работе<sup>1</sup> был разработан программный код, выполняющий численное моделирование течения внутри каналов путем решения в них осредненных по сечению одномерных уравнений Навье-Стокса. Была показана правильность результатов работы данного кода на начальном этапе развития возмущений и сделано предположение о его работоспособности на более поздних, нелинейных стадиях. Следующим этапом работы является присоединение данного кода к программе, рассчитывающей течение в области над пластиной и получение представления об эффективности данного метода гашения возмущений в пограничном слое.

---

<sup>1</sup> Михайлова У. В. Моделирование течения в каналах пористого покрытия, используемого для стабилизации гиперзвукового пограничного слоя. Выпускная квалификационная работа бакалавра. НГТУ, Новосибирск, 2021.-29 с.



В нашем распоряжении имеется два программных кода на языке Fortran. Первый написан в соответствии с линейной теорией устойчивости и является вспомогательным. В нем находятся профили пограничного слоя, область неустойчивости и коэффициент роста возмущений при некотором волновом числе  $\alpha$ . После этого получаются собственные функции возмущений продольной и поперечной скорости, плотности и температуры. Данные возмущения периодичны, они растут во времени и в общем случае имеют следующий вид:

$$\psi'(x, y, z, t) = \operatorname{Re}\{\hat{\psi}(y)e^{i(\alpha x + \beta z - \omega t)}\},$$

где  $\alpha, \beta \in R, \omega = \omega_r + i\omega_i$ .

Вещественная часть  $\omega$  отвечает за форму колебаний, а мнимая – за их рост, то есть возмущения растут по экспоненте  $e^{\omega_i t}$ . Уравнения Навье-Стокса можно линеаризовать относительно возмущений, когда те достаточно малы, тогда в получающейся системе ОДУ все коэффициенты зависят от  $y$  и не зависят от  $x, t, z$ . Данная система решается нашим кодом итерационно.

Существует некоторое волновое число, при котором возмущения наиболее неустойчивы. Такие возмущения должны довольно быстро обогнать в росте все остальные и начать доминировать. Чтобы определить максимальный коэффициент роста  $\omega_i$  и соответствующее ему волновое число  $\alpha$ , вышеупомянутая программа была запущена несколько раз. При каждом новом запуске  $\alpha$  менялось. В результате был получен график зависимости  $\omega_i(\alpha)$  (рис. 1). Видно, что максимальному  $\omega_i$  соответствует  $\alpha = 0.116$ .

Для предварительной оценки эффективности пор, параметры гладкой стенки были заменены на параметры пористой, после чего снова был построен график зависимости  $\omega_i(\alpha)$ . На рис. 2 показано его сравнение с графиком, полученным для гладкой пластины. Параметры пористой стенки: радиус пор  $R_{por} = 0.8$ , глубина  $H_{por} = 10$ , пористость  $S_{por} = 0.5$  (обезразмеривание выполнено по толщине пограничного слоя). Коэффициент роста возмущений ощутимо уменьшился, однако можно добиться лучших результатов подбором вышеперечисленных параметров, что планируется сделать в дальнейшем.

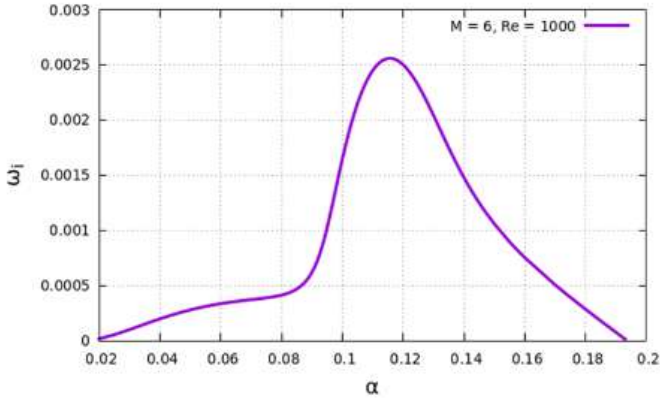


Рис. 1 – Зависимость коэффициента роста  $\omega_i$  от волнового числа,  $M = 6, Re = 1000$

Второй имеющийся у нас программный код необходим для численного моделирования течения над пластиной, в нем решаются полные уравнения Навье-Стокса. Задача рассматривается в постановке, когда течение предполагается периодическим по пространственной координате и развивающимся во времени. В качестве начальных условий здесь указываются найденные ранее собственные функции. Граничные условия с левого и правого конца рассчитываемой области периодические, для верхнего края – неотражающие: волны спокойно покидают область расчета. На пластине поставлены адиабатические граничные условия. Длина расчетной области  $L_x = \frac{2\pi}{\alpha_{\max}}$ , где  $\alpha_{\max}$  –

волновое число возмущения с максимальным коэффициентом роста. При решении уравнений Навье-Стокса для аппроксимации невязких членов используется одна из современных схем сквозного счета - WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) 5-го порядка, для вычисления вязких членов применяются центральные разности 4-го порядка. Интегрирование по времени осуществляется явной SSP (Strong Stability Preserving) схемой Рунге 3-го порядка. Результатом работы программы являются функции изменения различных величин в некоторой точке пространства.

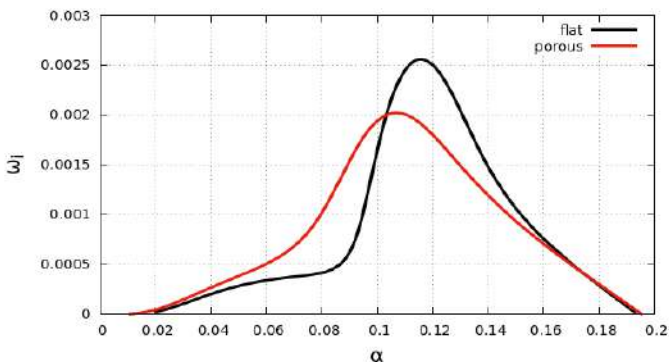


Рис. 2 – Сравнение графиков  $\omega_i(\alpha)$  для гладкой и пористой поверхности,  $M = 6, Re = 1000$

Прежде чем приступить к объединению данной программы с кодом, рассчитывающим течения внутри каналов, необходимо было проверить ее работоспособность. Первым делом, нужно было выяснить, действительно ли возмущения нарастают по экспоненте, как это предсказывает линейная теория. Для этого на построенные кривые возмущений были наложены функции  $e^{a_i t}$  и  $e^{-a_i t}$ , где  $a_i$  – определенный ранее максимальный коэффициент роста. В качестве примера представлен график возмущения поперечной скорости (рис. 3), на котором видно, что возмущения растут в полном соответствии с линейной теорией устойчивости.

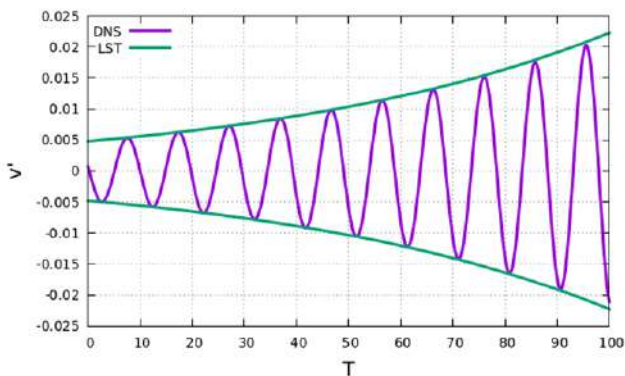


Рис. 3 – Зависимость амплитуды возмущения поперечной скорости  $v'$  от времени  $T, M = 6, Re = 1000$

Далее необходимо было проверить, насколько хорошо профили возмущений совпадают с собственными функциями, для чего кривые строились на одном графике. Результаты представлены на рис. 4 – 7. Видно, что форма графиков практически совпадает, однако имеются некоторые расхождения, причину которых предстоит выяснить.

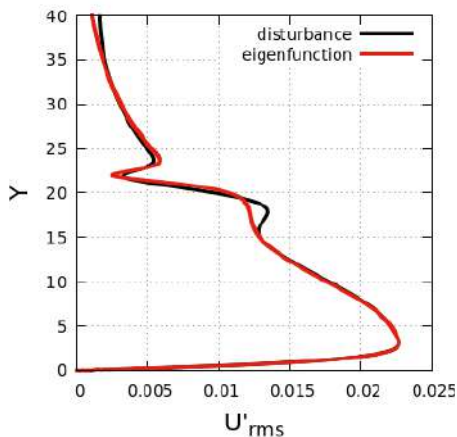


Рис. 4 – График среднеквадратичной пульсации x-компоненты скорости

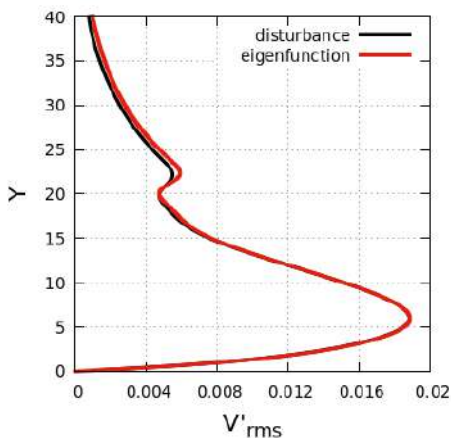


Рис. 5 – График среднеквадратичной пульсации y-компоненты скорости

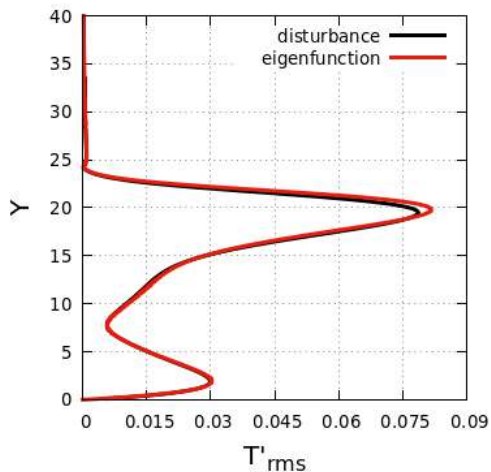


Рис. 6 – График среднеквадратичной пульсации температуры

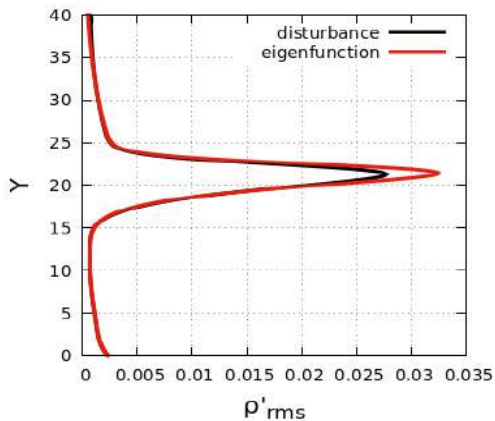


Рис. 7 – График среднеквадратичной пульсации плотности

Определенный интерес представляет также внешний вид полей возмущений различных величин. В программе, решающей полные уравнения Навье-Стокса, записывался файл с соответствующими данными, который затем визуализировался с помощью программы Tecplot. Соответствующие картины представлены на рис. 8 – 11.

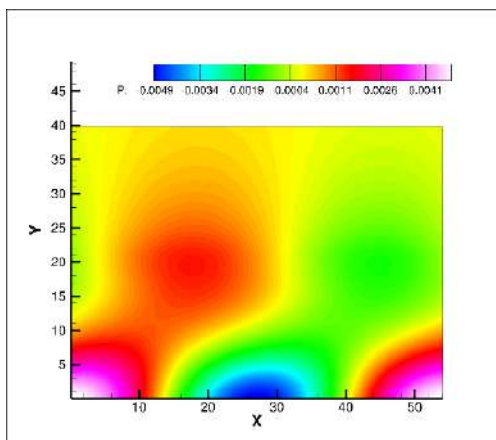


Рис. 8 – Поле давления  $p$

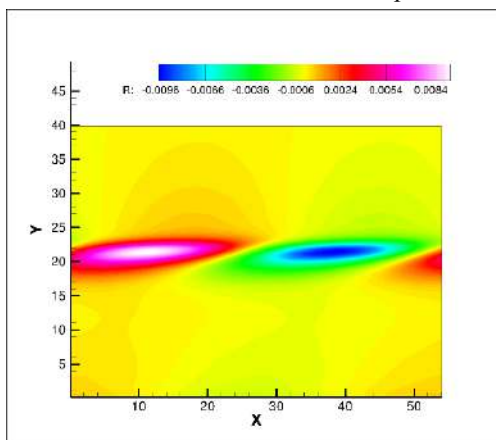


Рис. 9 – Поле плотности  $\rho$

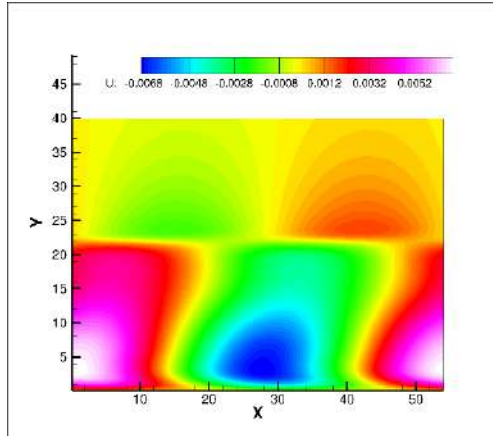


Рис. 10 – Поле x-компоненты скорости  $u$

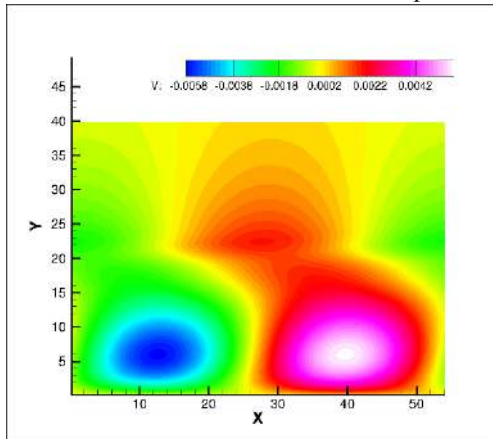


Рис. 11 – Поле y-компоненты скорости  $v$

Возмущения не должны менять свою форму, что доказывает рис. 12, на котором представлено поле в начальный момент времени и при  $t = 100$ : возмущения плотности перемещаются вдоль оси  $Ox$ , меняя амплитуду, но их внешний вид остается прежним.

Проведенные испытания доказывают работоспособность программы для граничных условий, соответствующих плоской пластине. В дальнейшем планируется изменить их на граничные условия для пористой стенки и доказать, что скорость роста возмущений на поверхности пластины уменьшается.

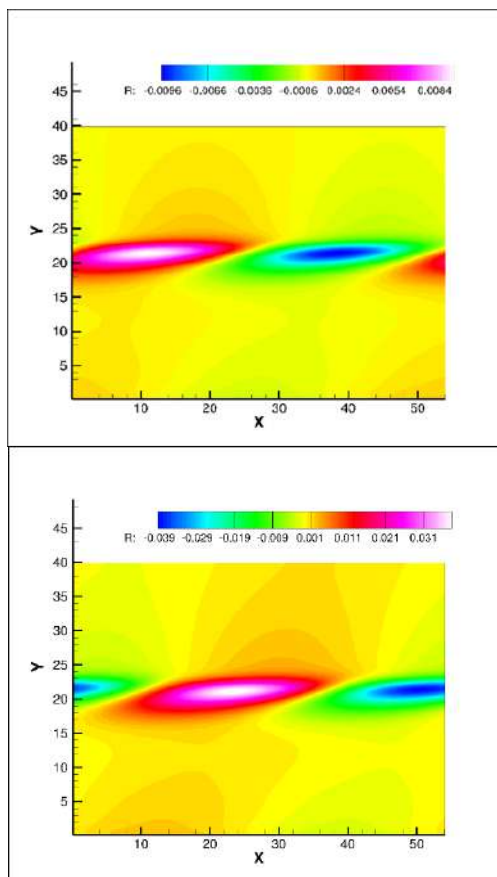


Рис. 12 – Поле плотности  $\rho$  при  $t = 0$  (вверху) и  $t = 100$  (внизу)

#### Литература:

1. Fedorov A. V., Malmuth N. D., Rasheed A., Hornung H. G. Stabilization of hypersonic boundary layers by porous coatings // AIAA Journal. – 2001. – Vol. 39, N 4. – P. 605–610.

2. Shiblyuk, A. N., Burov, E. V., Maslov, A. A., Fomin, V. M. Effect of Porous Coatings on Stability of Hypersonic Boundary Layers // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2004. – Vol. 45, N 2. – P. 286–291.

3. Receptivity of a hypersonic boundary layer over a flat plate with a porous coating / I.V. Egorov, A.V. Fedorov, V.G. Soudakov // J. Fluid Mech. – 2008. – Vol. 601, pp. 165-187. – doi: 10.1017/S0022112008000669.



4. Neil D. Sandham, Heinrich Lüdeke. Numerical Study of Mach 6 Boundary-Layer Stabilization by Means of a Porous Surface // AIAA Journal. – 2009. – Vol. 47, N 9. – P. 2243-2252.

4. Viola Wartemann, Heinrich Lüdeke, Neil D. Sandham. Numerical Investigation of Hypersonic Boundary-Layer

Stabilization by Porous Surfaces // AIAA Journal. – 2012. – Vol. 50, N 6. – P. 1281-1290.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ БОРА ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ**

**А.А. Сыроватень<sup>1,2</sup>,**

**<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет,**

**<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики**

**им. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, verlovaalex@gmail.com**

**Научный руководитель: Бедарев И. А., к.ф.-м.н., зав.лаб.**

*Представлена математическая модель, основанная на модифицированной PSU-модели горения бора, постановка задачи моделирования воспламенения и горения микрочастицы бора за отраженной ударной волной. Процесс горения бора является двухстадийным, соответственно рассмотрены две стадии: воспламенение и горение частицы бора. Описаны модификации, внесённые в PSU-модель и показано качественное согласование с экспериментом.*

*The mathematical model based on a modified PSU-model combustion of boron is presented, setting the problem of modeling ignition and combustion of boron microparticles behind a reflected shock wave. The boron burning process is a two-step, respectively, two stages are considered: ignition and burning of the boron particle. Modifications entered in the PSU model are described and high-quality approval with the experiment is shown.*

Одним из высокоэффективных материалов, добавляемых к твёрдому или гелеобразному топливу, служит бор и его соединения. Он занимает второе место по теплоте сгорания после бериллия. Бериллий, являясь самой эффективной добавкой, исходя из параметров теплоты сгорания с кислородом или водой, на данный момент не используется, так как производит очень токсичные оксиды BeO.

При нормальных условиях частица бора радиусом 1-50 мкм покрыта тонким оксидным слоем – B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, толщина которого составляет 0.02–0.03 мкм. Бор выделяется среди остальных добавочных компонентов своими температурными свойствами. Температура плавления оксидного

слоя – 723 К, что гораздо ниже температура плавления чистого бора – 2450 К. Соответственно частица избавляется от оксидного слоя при относительно невысокой температуре.

В основном экспериментальные исследования по воспламенению и горению частиц бора проводят в газовых горелках. Один из первых успешных экспериментов был проведен в 1969 Масек и Semple [1]. В статье выделены основные особенности процесса горения бора. Также приведены скорость частицы при воспламенении, времена задержки воспламенения и время горения.

Топливо, к которому добавляются частицы бора, находится в камере сгорания в течение около 20 мкс, соответственно нужно обеспечить необходимый размер частиц, которые успеют максимально эффективно прореагировать в течение этого промежутка времени. К тому же реакции в камере сгорания происходят при повышенном давлении. Эксперимент в условиях повышенного давления был проведен в [2]. Частицы воспламенялись за отражённой от стенки ударной волной.

Одна из основных современных моделей, описывающих процесс горения бора, – PSU-модель. В [3, 4] представлено подробное описание этой модели и приведены дифференциальные уравнения. В модели рассматривается двухстадийный процесс горения. Модель предполагает решение системы ОДУ, состоящей из 6 уравнений. Модель может быть использована при наличии нескольких окислителей. Однако, в нашей работе учитываются реакции только с кислородом.

Целью данной работы является разработка вычислительного алгоритма для расчета воспламенения и горения одиночной микрочастицы бора в газе за отраженной ударной волной, основанного на модифицированной PSU-модели горения частиц бора.

В данной работе предлагается следующая постановка задачи. В начальный момент времени частица покоится. На покоящуюся частицу набегают проходящая ударная волна, унося за собой частицу. Ударная волна отражается от стенки, частица попадает в область за отражённой ударной волной, где происходит её воспламенение.

Начальные параметры: скорость частицы  $U=0$  м/с; температура частицы  $T_p=300$  К; давление, скорость и температура газа определяются в зависимости от числа Маха ударной волны и рассчитываются из соотношений на ударной волне; радиус и толщина оксидного слоя задаются в зависимости от условий задачи.

Математическое моделирование поставленной задачи предполагает численное решение системы из шести дифференциальных уравнений для: координаты, скорости, радиуса, температуры частицы, толщины оксидного слоя и доли расплавленного бора.

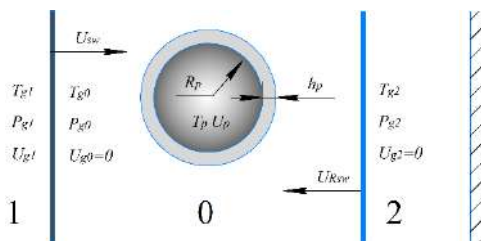


Рис. 1 – Схема моделирования

**Результаты расчёта.** Проведены расчёты для двух размеров частиц 7.5 и 20 мкм. Число Маха варьировалось от 3.5 до 4.5, что позволило провести расчёт в волнах разной интенсивности. Начальное давление изменялось, чтобы обеспечить давление за отражённой ударной волной, сопоставимое с экспериментом. Расчётные времена задержки воспламенения приведены в табл. 1.

**Таблица 1 – параметры ударных волн и времени задержки воспламенения**

M <sub>sw</sub>	P <sub>0</sub> , Па	P <sub>2</sub> , Па	T <sub>2</sub> , К	t <sub>ign</sub> , мс,	
				D <sub>p</sub> =7.5 мкм	D <sub>p</sub> =20 мкм
3.5	10800	850000	1840	4.3	5.67
3.6	10000		1934	1.7	2.46
3.7	9400		2030	0.75	1.29
3.8	8750		2129	0.38	0.81
3.9	8200		2230	0.22	0.59
4.0	7700		2334	0.15	0.46
4.1	7200		2441	0.11	0.38
4.2	6800		2550	0.074	0.33
4.3	6400		2662	0.057	0.29
4.4	6050		2777	0.049	0.25
4.5	5700		2894	0.044	0.22

На рис. 1 изображено распределение: температуры (красным цветом), толщины оксидного слоя (зеленым цветом) и радиуса частицы (синим цветом). Зоны 1 и 2 соответствуют двум последовательным стадиям горения бора. Зона 1 характеризует задержку воспламенения и зона 2 – горение чистой частицы бора.

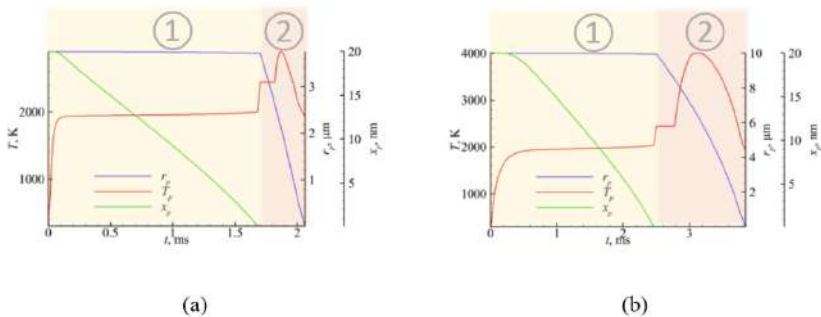


Рис. 2 – Результаты численного моделирования при  $T_g=1934\text{ K}$ ,  
 а –  $dp = 7.5\text{ мкм}$ , и б –  $dp = 20\text{ мкм}$

Согласование с экспериментом [2] по времени задержки воспламенения, показанное на рис. 3, было получено при температуре окружающего газа от 2200 до 3000 К.

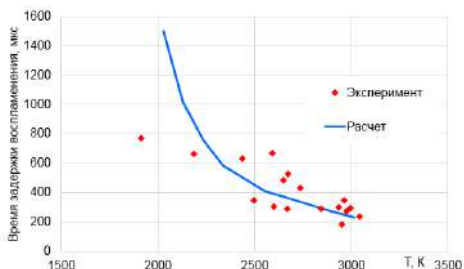


Рис. 3 – Зависимость времени задержки воспламенения  
 от температуры окружающего газа

Также удалось преодолеть один из недочётов PSU- модели горения бора, связанный с завышенными значениями температуры для крупных частиц при помощи учёта кипения бора.

**Заключение.** Разработан вычислительный алгоритм для расчёта воспламенения и горения бора за ударными волнами. Получена структура волны горения, включающая нагрев, плавление, кипение и соответствующие химические реакции. Получено согласование с экспериментом в области температур окружающего газа 2200-3000 К.

Литература:

1. Masek, A. and Semple, J. M., Combustion Science Technology, 1, 181-191 (1969).

2. Krier H., Burton R. L., Pirman S. R., Spalding M. J., Shock Initiation of Crystalline Boron in Oxygen and Fluorine Compounds, Journal of propulsion and power, 1996, № 12, No. 4, pp. 672-679.

3. Yeh, C. L., Kuo K. K., Ignition and Combustion of Boron Particles. Ph.D. thesis, Pennsylvania State University, (1996).

4. Ulas A., Kuo K.K., Gotzmer C., Ignition and combustion of boron particles in fluorine containing environments, Combustion and Flame, 2001, № 127, pp. 1935–1957.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ КОНГЛОМЕРАТОВ ЧАСТИЦ БОРА ПОТОКОМ ГАЗА**

**К.В. Костюшин, А.В. Червакова**

**Научно-исследовательский институт прикладной математики и  
механики Томского государственного университета, г. Томск,  
ch-nastya1997@mail.ru**

*Разработана методика расчета движения конгломератов произвольной формы в газовом потоке. Проведены численные исследования движения эквивалентных по массе конгломератов в однородном и ускоряющемся газовых потоках. Получено, что для рассматриваемых конфигураций конгломератов при движении в однородном потоке заметно существенное отклонения частиц от оси симметрии, а при движении в ускоряющемся потоке наблюдаются признаки стабилизации частиц.*

*A method for calculating the motion of conglomerates of arbitrary shape in a gas flow has been developed. Numerical studies of the motion of conglomerates of equivalent mass in homogeneous and accelerating gas flows are carried out. It was found that for the conglomerate configurations under consideration, when moving in a uniform flow, a significant deviation of particles from the axis of symmetry is noticeable. When moving in an accelerating flow, there are signs of particle stabilization.*

В настоящее время высокоэнергетические борсодержащие композиции рассматриваются в качестве наиболее перспективных топлив для беспилотных летательных аппаратов. В связи с этим большой теоретический и практический интерес представляют задачи моделирования многофазной газовой динамики с учетом агломерации частиц бора при горении борсодержащих высокоэнергетических композиций. При создании эффективных вычислительных моделей особое место занимает моделирование движения конгломератов частиц бора в высокотемпературном потоке газа. Целью настоящей работы

является разработка методики расчета обтекания конгломератов частиц бора произвольной формы потоком газа.

Рассматривается задача моделирования движения конгломерата в газовом потоке. Для описания нестационарного течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа используется система уравнений Навье-Стокса [1]:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0; \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $x_j$  – декартова координата, м;  $u_j$  – проекция вектора скорости потока, м/с.

Уравнение движения:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] = 0. \quad (2)$$

где  $p$  – давление, Па;  $\delta_{ij}$  – оператор Кронекера;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j E + u_j p + q_j - u_i \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

где  $E$  – полная энергия, Дж;  $q_j$  – тепловой поток, Дж/(м<sup>2</sup>·с):

Система уравнений (1)–(3) замыкается уравнением состояния идеального газа:

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

где  $T$  – температура, К;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Для замыкания системы уравнений вязкого газа использовалась модель турбулентности SST  $k-\omega$  [2].

В работе решалась задача моделирования движения конгломерата в однородном и ускоряющемся газовых потоках. Геометрия расчетной области представлена на рис. 1. Геометрия рассматриваемых конгломератов представлена на рис. 2.

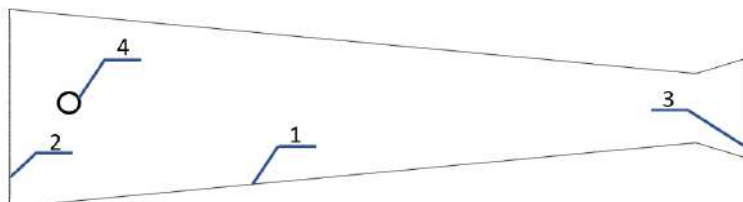


Рис. 1 – Геометрия расчетной области: 1 – стенки сопла; 2 – входное сечение; 3 – выходное сечение; 4 – конгломерат

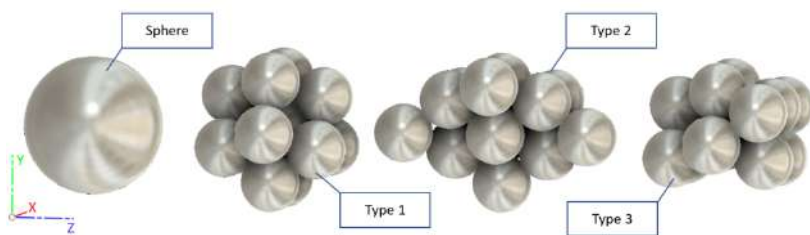


Рис. 2 – Геометрия конгломератов

В качестве начальных условий в расчетной области задаются скорость, давление и температура. На входе фиксируется давление и температура; на стенках ставятся условия непротекания; на поверхности конгломератов задаются условия прилипания.

Численное решение системы (1)–(4) производится на базе программного обеспечения ANSYS Fluent с использованием схем типа Годунова.

Проведены численные исследования движения произвольных конфигураций конгломератов в однородном и ускоряющемся газовых потоках. Получено, что для рассматриваемых конфигураций конгломератов при движении в однородном потоке заметно существенное отклонения частиц от оси симметрии, а при движении в ускоряющемся потоке наблюдаются признаки стабилизации частиц.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 21-19-00541).

Литература:

1. Пирогов В. Б., Северинов Л. И. О расчете внутренних течений вязкого теплопроводного газа // ВИНТИ, № 3359-77 Деп.
2. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST Turbulence model // Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence. Heat and Mass Transfer. Begell House Inc., West Redding. 2003. P. 625–632.

# ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА СТРУКТУРУ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПРЕГРАДОЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ГАЗА

**А.В. Червакова, К.В. Костюшин**

**Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск, ch-nastya1997@mail.ru**

*Разработана методика расчета нестационарного течения продуктов сгорания в соплах ракетных двигателей и взаимодействия двухкомпонентной сверхзвуковой струи с плоской преградой. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [1], получено хорошее совпадение. Проведено численное исследование структуры и ширины зоны смешения истекающей сверхзвуковой струи с окружающей средой в зависимости от степени нерасчетности, формы сопла и расстояния от среза сопла до преграды. Получено, что ширина зоны смешения для профилированного сопла меньше, чем для конического, минимальная ширина зоны смешения наблюдается на расчетном режиме, расстояние от среза сопла до преграды на зону смешения для фиксированных степеней нерасчетности сказывается слабо.*

*A method for calculating the unsteady flow of combustion products in the nozzles of rocket engines and the interaction of a two-component supersonic jet with a flat obstacle has been developed. Comparison of the calculation results with experimental data [1] is carried out, good agreement is obtained. A numerical study of the structure and width of the mixing zone of the exiting supersonic jet with the environment is carried out, depending on the pressure ratio, the geometry of the nozzle and the distance from the nozzle outlet to the obstacle. It is found that the width of the mixing zone for a profiled nozzle is less than for a conical one. The minimum width of the mixing zone is observed in the design mode. The distance from the nozzle outlet to the obstacle on the mixing zone for fixed pressure ratios has low effect.*

В настоящее время в России и за рубежом активно проводятся экспериментальные [1,2] и расчетно-теоретические исследования высокоскоростных многофазных реагирующих потоков, физических процессов при запуске ракет, спуске и посадке космических аппаратов. Большое внимание уделяется взаимодействию сверхзвуковых струй с препятствиями [3]. При этом процессы формирования зоны смешения на границе струи и в зоне периферийного течения для различных конфигураций и режимов работы сопел изучены недостаточно. Целью данной работы является разработка методики и алгоритма расчета пространственных течений смеси газов в сопловых блоках ракетных двигателей, численное исследование структуры и ширины зоны смешения истекающей сверхзвуковой струи с окружающей средой при



натекании на плоскую преграду в зависимости от степени нерасчетности и геометрии сверхзвуковой части сопла.

В работе исследовалась структура двухкомпонентной сверхзвуковой струи при взаимодействии с плоской преградой при разных степенях нерасчетности. Нестационарное пространственное течение идеального многокомпонентного газа можно описать системой уравнений Эйлера, в которую добавлены законы сохранения для дополнительных компонентов смеси газов [4,5]:

$$\frac{d}{dt} \left( \iiint_G \rho dG \right) + \oint_S \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \iiint_G \rho \mathbf{v} dG \right) + \oint_S (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p \hat{\mathbf{I}}) \cdot d\mathbf{S} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \iiint_G e dG \right) + \oint_S (e + p) \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \iiint_G \rho \alpha_n dG \right) + \oint_S \rho \alpha_n \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = 0; \quad (4)$$

где  $t$  – время;  $G$  – конечный объем;  $dG$  – элемент объема;  $S$  – поверхность, ограничивающая область  $G$ ;  $d\mathbf{S}$  – ориентированный элемент поверхности  $S$ ;  $\rho$  – плотность смеси;  $p$  – давление смеси;  $e$  – полная энергия единицы объема;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости потока;  $\alpha_n$  – массовая концентрация компонента смеси;  $\hat{\mathbf{I}}$  – единичный тензор  $3 \times 3$ . Система уравнений (1)-(4) замыкается уравнениями состояния для идеальной смеси газов.

В качестве начальных условий в расчетной области задаются скорость  $\mathbf{v}=0$ , давление  $P_a=101325$  Па, температура  $T_a=300$  К и концентрации компонентов газовой смеси  $\alpha_1=0$ ,  $\alpha_2=1$ , где  $\alpha_1$  – массовая концентрация рабочего тела,  $\alpha_2$  – массовая концентрация газа в свободном объеме. В качестве граничного условия на входе в сопло задаются условия постоянства энтропии, энтальпии и состава смеси газов ( $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=0$ ). На преграде и стенках сопла задаются условия непротекания. На внешних границах расчетной области используются мягкие граничные условия:  $\partial/\partial \mathbf{n}=0$ .

Для численного решения уравнений (1)-(4) используется схема Годунова, адаптированная для произвольного числа граней в расчетной

ячейке. Для расчета параметров на гранях ячеек используется точное решение задачи Римана [6].

В работе рассматривались коническое и профилированное сопла с числом Маха на срезе  $M=2.52$ . В качестве рабочего тела использовался воздух. Преграда располагалась перпендикулярно оси струи. Расстояние от среза сопла до преграды варьировалось. Исследования проведены для степеней нерасчетности  $n=0.46$ ; 1; 1.8.

На рис. 1 представлено сравнение результатов расчетов для степени нерасчетности  $n=0.46$  и расстояния до преграды  $x/R_e=1.84$  калибра с экспериментальными данными [1]. Получено хорошее совпадение для распределений давления вдоль преграды.

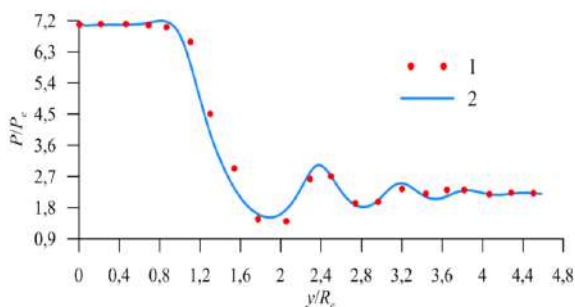


Рис. 1 – Распределение давления на преграде при  $n=0.46$  и  $x/R_e=1.84$ : 1 – экспериментальные данные авторов [1], 2 – результаты расчета

Проведены численные исследования структуры и ширины зоны смещения сверхзвуковой струи при взаимодействии с плоской преградой двухкомпонентного газа в зависимости от степени нерасчетности и формы сопла.

На рис. 2 показано сравнение ширины зоны смещения вдоль границы струи для расстояния до преграды  $x/R_e=5$  калибров при разных степенях нерасчетности для конического и профилированного сопел.

Хорошо видно характерное увеличение ширины зоны смещения вдоль оси струи. Видно, что минимальная ширина зоны смещения наблюдается на расчетном режиме. При сравнении конфигураций струй, реализуемых на режиме перерасширения и расчетном режиме истечения, ширина зоны смещения вдоль оси струи для профилированного сопла меньше, чем для конического. В случае реализации режима течения с недорасширением результаты для конического и профилированного сопел мало отличаются.

Полученные результаты планируется использовать в качестве основы для реализации методики расчета, позволяющей исследовать

пространственные течения в камерах сгорания и сопловых блоках ракетных двигателей с физико-химическими превращениями.

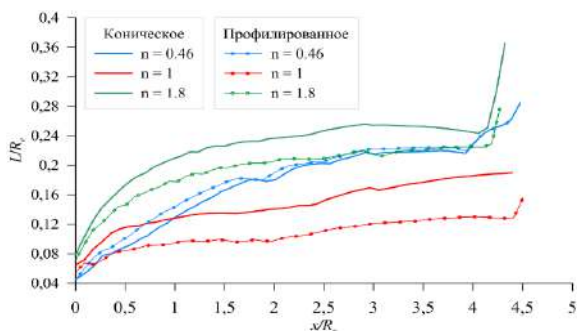


Рис. 2 – Ширина зоны смешения вдоль границы струи

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

#### Литература:

1. Мельникова М.Ф., Нестеров Ю.Н. Воздействие сверхзвуковой нерасчетной струи на плоскую преграду, перпендикулярную оси струи // Ученые записки ЦАГИ. 1971. Т. 2. № 5. С. 44–58.
2. Губайдуллин Д. А. Динамика двухфазных парогазокапельных сред. / Д. А. Губайдуллин. – Казань: Изд-во Казанского математического общества, 1998. – 156 с.
3. Глазунов А.А., Кагенов А.М., Костюшин К.В., Еремин И.В., Алигасанова К.Л., Котоногов В.А. Математическое моделирование взаимодействия одиночной сверхзвуковой струи с преградами // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2020. № 63. С. 87-101.
4. Гидаспов В. Ю. Элементарные модели и вычислительные алгоритмы физической газовой динамики. Одномерные нестационарные течения : учебное пособие / В. Ю. Гидаспов, Н. С. Северина. - Москва : Факториал, 2015. - 83 с.: ил.
5. Пирумов У. Г. Течения газа в соплах / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. - М. : Издательство Московского университета, 1978. - 351 с.: ил.
6. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др.; под ред. С. К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.: ил.

**Секция ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
И СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛА**

**ТРЕНИРОВОЧНЫЙ МОТОПЛАНЕР F5B/7**

**А.Е. Афанасьев**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, afegal07@gmail.com**

**Научный руководитель: Круглов О.В.  
педагог дополнительного образования. МАУ ДО ДЮЦ «Планетарий»**

*Когда я только начал заниматься авиамоделированием, после долгих тренировок на авиасимуляторе, мне уже понадобился настоящий летательный аппарат. Выбор пал конечно же на мотопланер, так как с ним легче всего изучить какие-то азы аэродинамики, конструкции самолета, ну и конечно же управления им. Собрать большой полноценный мотопланер было бы глупо, только потому что я бы его в первый же день полетов сломал, а потом очень долго восстанавливал и на втором полете все равно бы снова его сломал. Мне нужен был мотопланер, который бы соответствовал моим требованиям.*

*When I first started doing aircraft modeling, after a lot of training on a flight simulator, I already needed a real aircraft. The choice fell, of course, on a motor glider, since with it is easiest to learn some basics of aerodynamics, aircraft design, and of course control it. It would be stupid to assemble a large full-fledged motor glider, just because I would have broken it on the first day of flights, and then I restored it for a very long time and on the second flight, I would have broken it again anyway. I needed a motor glider that would meet my requirement.*

### **Цель работы**

Создание бюджетной модели мотопланера.

### **Задачи**

1. Выбор схемы и компоновки

Схема классическая, представлена на рис. 1.

2. Выбор материала

Подобраны бюджетные материалы: пенопласт, сосновые рейки, фанера (миллиметровая и трехмиллиметровая), бальза, карбоновая удочка, зубочистки, бумага, дюраль, бамбуковые палочки (шашлычные), цветной скотч или пленка, поводковый материал, бугылка.

3. Сборка модели

Сборка модели описана в более полном техническом описании. работе и рассказать в 2-3 предложениях будет сложно.

4. Летные испытания

При сборке планер выходит достаточно легким от 240 г до 250 г, но способным идти против несильного ветра. Благодаря своему незначительному весу и хорошей тяги (соответственно хорошему мотору с аккумулятором) планер легко набирает нужную высоту и достаточно долго планирует вниз. На нем так же можно выполнять различные фигуры. Если летать на нем без посадки с аккумулятором, то есть набирать высоту и планировать (и так по кругу (циклу)) можно до 50 мин. Если экономить заряд, то до 75-80 мин. Но это все зависит от аккумулятора, его заряда и от опыта. На соревнованиях с ним занять 1 место возможно или по крайней мере составить достойную конкуренцию. Если с ним обращаться как с учебным, то новичок научится азам аэродинамики, конструкции самолета, управления им, приобретет уверенность, и научится некоторым фигурам. Когда новичков нет, планер служит для показа разных шоу для публики, все это выглядит достаточно эффектно.

#### 5. Расчет стоимости производства

Стоимость модели без учета пульта управления и передатчика составила 1500 руб.



Рис.1 – Тренировочный мотопланер F5B/7

#### Заключение

Создана модель мотопланер. Разработана конструкция самолета, а также подобраны материалы и произведены полеты. Данную модель мотопланера можно использовать всеми авиационными школами и кружками авиа-моделирования. На модели новички могут обучиться азам аэродинамики, изучить конструкцию самолета, получить навыки управления планером/самолетом. Новичок приобретет уверенность, и после всего этого он может пойти с ним на свои первые соревнования.

Имея навыки пилотирования планер можно использовать для разнообразных шоу или отдыха и развлечения.

Литература:

1.Болонкин А.А. Теория полета летающих моделей [https://www.rdita.kg/content/0/Knigi\\_po\\_aviacionnomu\\_modelirovaniyu](https://www.rdita.kg/content/0/Knigi_po_aviacionnomu_modelirovaniyu)

2.Вилле Р. Постройка летающих моделей-копий [https://www.rdita.kg/content/0/Knigi\\_po\\_aviacionnomu\\_modelirovaniyu](https://www.rdita.kg/content/0/Knigi_po_aviacionnomu_modelirovaniyu)

## **КРОВЕНОСНАЯ СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

**Е. В. Беляева, Е. С. Гагаркина**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, e-mail: liza\_belaeva\_2014@mail.ru;**

**gagarkina.liza@mail.ru**

**Научный руководитель: И. В. Хромова, к.т.н., доцент**

*В настоящей статье рассматриваются вопросы моделирования и расчета гидравлических характеристик кровеносной системы человека с учетом морфологических особенностей сосудистого русла. Описаны особенности строения различных участков кровеносной системы и методика расчета расхода крови на расчетные элементы, в зависимости от уровня физической активности человека и состояния организма.*

*This article discusses the issues of modeling and calculating the hydraulic characteristics of the human circulatory system, taking into account the morphological features of the vascular bed. The features of the structure of various parts of the circulatory system and the method of calculating blood flow to the calculated elements, depending on the level of physical activity of a person and the state of the body, are described.*

В настоящее время актуальной задачей является разработка средств защиты, необходимых для компенсации нарушений в организме человека вследствие гиподинамии в условиях космического полета. Больше всего от воздействия гиподинамии страдают опорно-двигательная и сердечно-сосудистая системы. Уменьшение нагрузки приводит к сокращению мышечной массы, деминерализации костной ткани, снижению силы сердечной мышцы, нарушению обмена веществ в клетках сердца и ухудшению состояния кровеносных сосудов.

Для нейтрализации негативных последствий используются тренажеры, учитывающие индивидуальные особенности организма.

Цель настоящей работы – описание методики расчета гидравлических характеристик кровеносной системы человека, исследование особенностей строения различных участков кровеносной системы и влияния уровня физической активности человека на расход крови на потребители в условиях невесомости и на Земле.

В работе представлена условная схема особенностей строения сосудистого русла и описаны механизмы кровообращения на каждом участке (рис. 1). Описываются методики расчета коэффициентов сопротивления, в зависимости от морфологического строения участка, и определения минутного объема крови через потребители в заданных условиях. Исследуется влияние таких особенностей, как вращение крови в аорте и крупных артериях, сопротивление участка артериол, изменение диаметра капилляров.

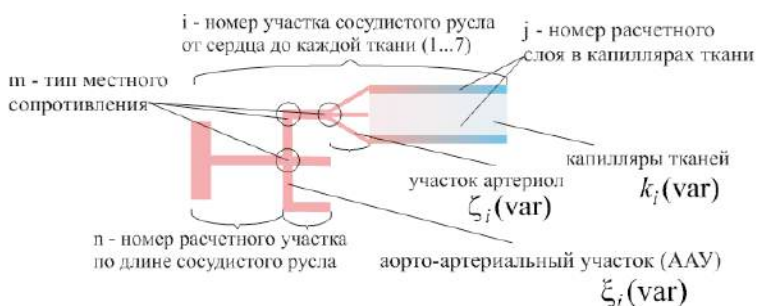


Рис. 1 – Условная схема особенностей строения сосудистого русла

Проведенные ранее исследования влияния гиподинамии на Земле и в невесомости позволили установить закономерности негативного влияния недостатка физической активности на работу кровеносной системы человека. В настоящей работе представлено сравнение перераспределения крови между расчетными элементами при разных уровнях физической нагрузки. Недостаток двигательной активности приводит к увеличению расхода крови на голову и внутренние органы. Большая интенсивность физической нагрузки приводит к увеличению расхода на мышцы миокарда, руки и ноги.

Исследование эффективности различных видов нагрузки в невесомости для компенсации гиподинамии позволило установить, что показатели объемного кровотока к голове и ногам больше соответствуют показателям нормы на Земле при комплексной тренировке (руки, ноги и грудная клетка) (рис. 2).

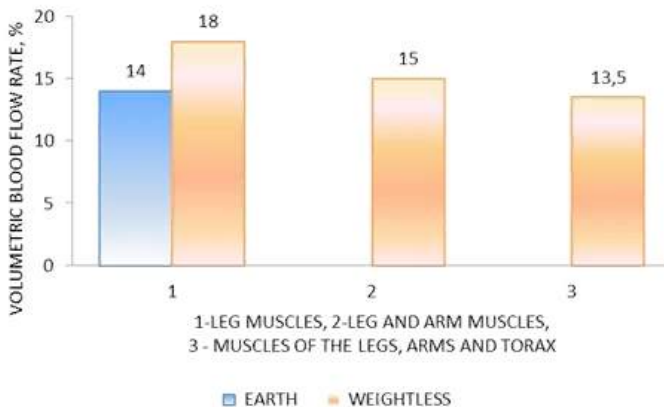


Рис. 2. – Влияние различных видов нагрузки на объемный кровоток в условиях невесомости

#### Литература:

1. 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.
2. V. P. Tregubov “Mathematical Modelling of Thenon-Newtonian Blood Flowin The Aortic Arc” / V. P. Tregubov // Computer Researchand Modeling - 2017. - Vol. 9. – № 2. – P. 259–269.
3. Березовский В.А. Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
4. Основы космической биологии и медицины. Том I. Космическое пространство как среда обитания. М.: Наука, 1975. - 450 с.
5. Основы космической биологии и медицины. Том II. Книга первая. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. М.: Наука, 1975. - 422 с.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРНОГО БЛОКА АВИАЦИОННЫХ СКВ

**А.А. Мешков, Е.А. Чичиндаева, А.В. Чичиндаев**  
Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, e-mail [chichindaev@corp.nstu.ru](mailto:chichindaev@corp.nstu.ru)

*В работе приведены результаты моделирования конденсаторного блока современных авиационных систем кондиционирования воздуха. В работе выполнено трехмерное CAD моделирование конструкции основных элементов блока. Во второй части работы выполнено трехмерная анимация конструкции и принципа работы элементов конденсаторного блока. Работа предназначена для внедрения в учебный процесс кафедры ТТФ в качестве учебного пособия и МООК по курсу «Современные системы кондиционирования воздуха».*

*The paper presents the results of modeling the condenser unit of modern aviation air conditioning systems. In the work, a three-dimensional CAD modeling of the structure of the main elements of the block has been carried out. In the second part of the work, a three-dimensional animation of the structure and the principle of operation of the elements of the capacitor unit is performed. The work is intended to be introduced into the educational process of the Department of TTF as a teaching aid and MOOCs for the course "Modern air conditioning systems".*

В настоящее время на всех современных самолетах: Ту-204, Superjet 100, МС-21 и зарубежных Boeing, Airbus получили распространение схемы систем кондиционирования воздуха (СКВ) нового поколения с отделением влаги на линии высокого давления («петли» в отечественной, «shoestring» в англоязычной литературе).

Одним из основных узлов данных схем является конденсаторный блок, который собственно и предназначен для выполнения этой функции - конденсации влаги в линии высокого давления СКВ.

Данный блок состоит из трех основных элементов (рис. 1).

**Теплообменник-конденсатор.** Основная цель теплообменника – произвести конденсацию паров воды на высоком давлении воздуха. Охлаждение осуществляется холодным воздухом с отрицательной температурой, получаемым на турбине турбохолодильной установки (ТХУ). Основная эксплуатационная особенность – обмерзание теплопередающей поверхности в холодном тракте и ее обледенение в горячем. Поэтому в конструкцию внедрены специальные противообледенительные элементы.

**Теплообменник-регенератор.** Основная цель теплообменника произвести осушение воздуха за счет испарения остатков воды, оставшихся после влагоотделителя, чтобы на вход в турбину ТХУ

поступал сухой воздух, и довести температуру до пригодной для работы турбины ТХУ.

**Влагоотделитель.** Основная цель влагоотделителя выполнить отделение сконденсированной воды от осушенного воздуха за счет центробежных сил. В дальнейшем данный конденсат поступает в продувочный тракт узла предварительного охлаждения для повышения эффективности работы СКВ ЛА.



Рис. 1. – Модель конденсаторного блока

В работе выполнено трехмерное CAD-моделирование конденсаторного блока (рис. 1). Основная цель моделирования получить единую блочную конструкцию из конденсатора, регенератора и влагоотделителя с учетом реальных габаритов и конструкций элементов. На втором этапе работы выполнена трехмерная анимация работы конденсаторного блока по двум направлениям: анимация особенностей конструкции всех элементов, анимация принципа работы (температура, давление и направление движения воздуха) элементов конденсаторного блока.

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры ТТФ НГТУ в рамках разрабатываемого MOOK «Современные системы кондиционирования воздуха» для проведения дистанционного обучения по дисциплинам: «Современные системы кондиционирования воздуха»,

«Агрегаты систем кондиционирования воздуха», а также для одноименного учебного пособия.

Литература:

1. 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. (Серия «Учебники НГТУ»).
2. Дьяченко Ю.В. Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе: учебное пособие / Ю.В. Дьяченко, А.В. Чичиндаев. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 87 с.
3. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы : учебное пособие / А.В. Чичиндаев . – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 436 с. - (Серия «Учебники НГТУ»).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНОГО БЛОКА ОХЛАЖДЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ СКВ**

**А.А. Мешков, Е.А Чичиндаева., А.В. Чичиндаев**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
г. Новосибирск, e-mail [chichindaev@corp.nstu.ru](mailto:chichindaev@corp.nstu.ru)

*В работе приведены результаты моделирования основного блока охлаждения современных авиационных систем кондиционирования воздуха (СКВ). В работе выполнено трехмерное САД моделирование конструкции основных узлов и элементов моноблока СКВ. Во второй части работы выполнено трехмерная анимация конструкции и принципа работы узлов и элементов моноблока СКВ. Работа предназначена для внедрения в учебный процесс кафедры ТТФ в качестве учебного пособия и МООК по курсу «Современные системы кондиционирования воздуха».*

*The paper presents the results of modeling the main cooling unit of modern aviation air conditioning systems (ACS). Three-dimensional CAD modeling of the design of the main components and elements of the ACS monoblock is performed in the work. In the second part of the work, a three-dimensional animation of the design and principle of operation of the nodes and elements of the ACS monoblock was performed. The work is intended to be introduced into the educational process of the Department of TTF as a teaching aid and MOOCs for the course "Modern air conditioning systems".*

В настоящее время на всех современных самолетах: Ту-204, Superjet 100, МС-21 и зарубежных Boeing, Airbus получили распространение схемы систем кондиционирования воздуха (СКВ) нового поколения с отделением влаги на линии высокого давления («петли» в отечественной, «shoestring» в англоязычной литературе).

Отличительная особенность схем изготовления СКВ в виде моноблока под названием основной узел охлаждения, который устанавливается при каждом двигателе самолетов. Структурно моноблок состоит из трех основных узлов (рис. 1).

**Турбоохладительная установка (ТХУ).** Является «сердцем» моноблока, приводящим в движение воздух в других узлах. Состоит из трех элементов: турбины для снижения температуры воздуха и выработки энергии для привода двух потребителей. Компрессор (первый потребитель, до 75 % энергии) предназначен для дополнительного увеличения исходного давления в моноблоке. Вентилятор (второй потребитель, до 25 % энергии) предназначен для продувки охлаждающим воздухом узла предварительного охлаждения.

**Узел предварительного охлаждения.** Основная цель провести предварительное охлаждение сжатого воздуха от исходных 200 °С до приемлемых для работы конденсаторного блока 60... 80 °С. Состоит из двух теплообменников: первичного для снижения входной температуры и основного для отвода теплоты полученной в компрессоре ТХУ. Охлаждение производится с помощью заборного воздуха, который прокачивается с помощью вентилятора ТХУ.

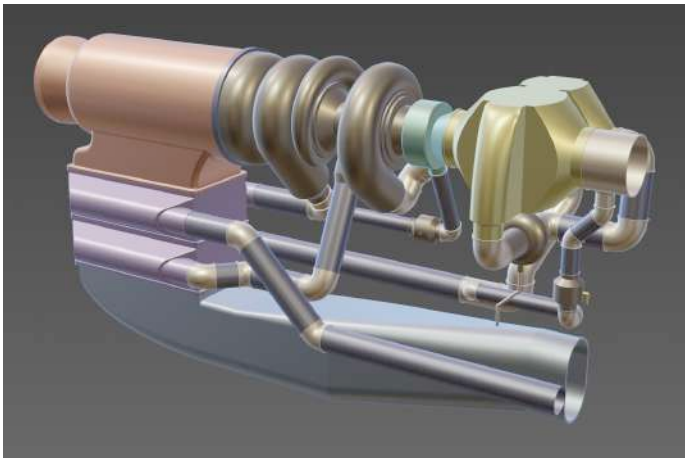


Рис. 1. – Модель моноблока основного узла охлаждения

**Конденсаторный блок.** Основная цель провести окончательное охлаждение воздуха от исходных 60... 80 °С до рабочей температуры на выходе моноблока -10 °С и выполнении при этом конденсации водяных паров из влажного воздуха и последующим отделением образовавшейся воды. Состоит из трех элементов: конденсатора для конденсации водяных паров, влагоотделителя для отделения сконденсированной влаги и регенератора для частичного подогрева и осушки сжатого воздуха перед подачей на турбину ТХУ.

В работе выполнено трехмерное CAD-моделирование моноблока основного узла охлаждения современных авиационных СКВ (рис. 1). Основная цель моделирования получить единую моноблочную конструкцию из основных узлов: ТХУ, узла предварительного охлаждения и конденсаторного блока с учетом реальных габаритов и конструкций элементов. На втором этапе работы выполнена трехмерная анимация моноблока по двум направлениям: анимация особенностей конструкции всех узлов и их элементов, анимация принципа работы (температура, давление и направление движения воздуха) элементов моноблока.

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры ТТФ НГТУ в рамках разрабатываемого МООК «Современные системы кондиционирования воздуха» для проведения дистанционного обучения по дисциплинам: «Современные системы кондиционирования воздуха», «Агрегаты систем кондиционирования воздуха», а также для одноименного учебного пособия.

#### Литература:

1. 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. (Серия «Учебники НГТУ»).
2. Дьяченко Ю.В. Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе: учебное пособие / Ю.В. Дьяченко, А.В. Чичиндаев. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 87 с.
3. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы : учебное пособие / А.В. Чичиндаев . – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 436 с. - (Серия «Учебники НГТУ»).

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА МЕТАЛОКЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

Д.А. Пономарев, В.А. Федоренко

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, vitya.fedorenko.335@mail.ru

Научный руководитель: Лукашов В.В., к.т.н., ведущий научный  
сотрудник ИТФ СО РАН

*Термобарьерное покрытие (ТБП) на основе оксидов Zr и Y широко используется для защиты теплонапряжённых поверхностей элементов энергетических и двигательных установок. Нанесение ТБП позволяет повысить температуру газового потока и улучшить ресурсные характеристики конструкции. В работе приведены результаты экспериментальных исследований ТБП.*

*Thermal barrier coating (TBP) based on Zr and Y oxides is widely used to protect heat-stressed surfaces of elements of power and propulsion systems. The application of TBP allows to increase the temperature of the gas flow and improve the resource characteristics of the structure. The paper presents the results of experimental studies of TBP.*

## Введение

При проведении термоциклических испытаний ТБП применяются методы, различающиеся как по способам организации процесса, так и по набору параметров, характеризующих интенсивность воздействия. Часто за основу методики проведения испытаний берётся стандарт ISO 14188. В стандарте ISO14188 рекомендован темп нагрева образца ~1.2 К/с. Под разрушением ТБП принимается нарушение целостности 30% и более от площади поверхности покрытия.

Известно, что одной из основных причин разрушения ТБП является рост термически выращенного на поверхности металла оксида (thermally grown oxide TGO). Хотя существует заметная разница в долговечности покрытия при каждом методе воздействия, режим разрушения и рост ТВО не зависят от методики испытаний. Так в ТВО в условиях постоянного градиента температуры возникла 30 мкм трещина, а в изотермических условиях - 55 мкм. В большинстве изотермических испытаний с круглыми плоскими образцами окончательное разрушение происходит по краю образца, в то время как образцы, испытанные при воздействии теплового потока, разрушаются в центре образца, где воздействие пламени максимально. В настоящее время разработаны различные полуэмпирические подходы, позволяющие прогнозировать время жизни ТБП с учётом конкретных условий эксплуатации.

### Постановка задачи

После серии из N испытаний производится фотофиксация состояния покрытия. Оценка стойкости покрытия к периодическим термическим нагрузкам на базе 1500 циклов. площади покрытия вследствие подслоной коррозии или разрушения керамического покрытия. Образец перемещается в пропан/кислородное пламя на 20+55 с. Скорость линейного перемещения составляет 20 мм/с. При этом «холодная» сторона непрерывно охлаждается потоком воздуха с комнатной температурой. После чего непрерывно охлаждаемый образец отводится на 40 с из зоны пламени. Скорость нагрева/охлаждения ~12К/с. Максимальные температуры на поверхности керамики не превышали 1200°C. Типичные термограммы показаны на Рисунке 2.



Рис. 1. – Фотография образца в процессе нагрева

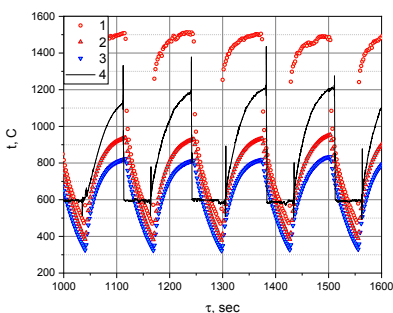


Рис.2 – Термограммы: 1 – газовый поток; 2 – температура на границе металл/керамика; 3 – на охлаждаемой стороне металла; 4- температура на «горячей» поверхности ТЗП

При температуре стенок, из которых вытекает импактная струя, равной 1000 °С, лучистая составляющая теплообмена снижает температуру поверхности ТЗП на величину 70-80 °С.

На рис. 4 приведено изображение центрального поперечного шлифа образца композиционного материала. Из полученных данных видно, что образец характеризуется слоистой структурой. По данным элементного анализа наблюдается не менее 5 слоев различного фазового состава. Детальный анализ микроизображений показал наличие между фазами 2 и 4 переходного (интерфейсного) слоя (фаза 3) со средним размером 9.5 мкм. Элементный анализ показал наличие в структуре слоя Zr, Ni, Cr, Al, O. Для изучения равномерности нанесения слоевых покрытий также

был получен поперечный шлиф образца композиционного материала ТС 3.1 GZO на расстоянии 5 мм от центрального шлифа. Данной области также характерно наличие не менее 5 слоев различного фазового состава практически полностью повторяющего состав центрального шлифа. Не наблюдается неравномерности нанесения покрытий по образцу.

Охлаждение за счёт лучистого теплообмена в окружающую среду позволяет организовать теплообмен таким образом, что при натекании на образец потока продуктов сгорания с температурой 1500 °С, температура на поверхности ТБП не превышала 1200 °С, а температура материала подложки при этом не превышала 950-980 С. Толщина TGO после 1500 °С термоциклов составила 9.5 мкм, значимых нарушений целостности покрытия не зафиксировано.

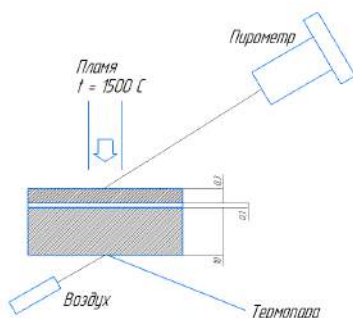


Рис.3 - Схема образца в процессе нагрева

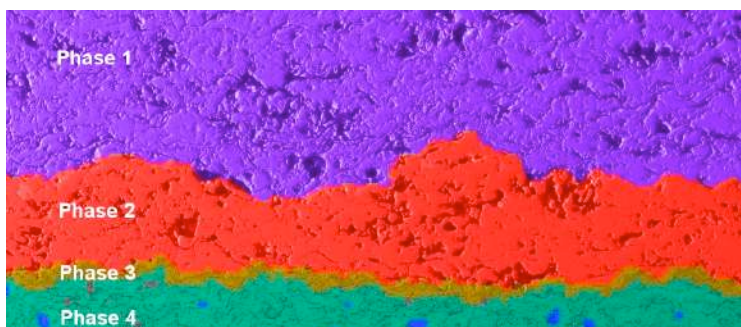


Рис.4 - ТВС структура после 1500 циклов термических испытаний, фаза 4 и фаза 5 - металлические слои, фаза 3 – TGO, фаза 5 и 6 - керамические слои



Литература:

1. Валиев Р.Р., Исследование плазменных теплозащитных покрытий для изделий машиностроения при циклических тепловых нагрузках: дисс.к.тн, 05.16.09. 2012.- 169 С.
2. Fry A. T., Banks J., Hans Peter Bossmann and Gregoire Witz, "Probabilistic lifetime prediction of TBC coated parts considering design, operation and manufacturing // ECI Symposium 2015. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.595-598.77
3. Beck T., Herzog R., Trunova O., Offermann M., Steinbrech R. W., Lorenz S. Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma-sprayed thermal barriercoating systems for gas turbines — Part II: Modeling// SurfaceCoatings Tech. 2008. V.202(24) 5901–5908.
4. Теплообмен излучением, Р. Зигель, Дж, Хауэл. Мир.М.: 1975
5. D A Ponomarev, V A Fedorenko, V S Naumkin and V V Lukashov Investigating the radiation-convective heat exchange of a metal-ceramic plate// et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2057 012024 - doi:10.1088/1742-6596/2057/1/012024

**РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ  
ТЕПЛОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ПЕРЕДАЧ СПЕЦИАЛЬНОГО САМОХОДНОГО  
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**И.И. Свяженни, Н.А. Маслов**

**Сибирский государственный университет путей сообщения,**

**г. Новосибирск, namaslov@mail.ru**

**Научный руководитель: Маслов Н.А., к.т.н., доцент**

*В работе выявлены причины перегрева силовых гидромеханических передач специального самоходного подвижного состава, выполнен сравнительный анализ систем охлаждения, предложены варианты тепловой защиты, даны рекомендации по выбору способа тепловой защиты передач.*

*The paper identifies the causes of overheating of power hydromechanical transmissions of special self-propelled rolling stock, a comparative analysis of cooling systems is performed, variants of thermal protection are proposed, recommendations on the choice of thermal protection of transmissions are given.*

Целью работы является разработка вариантов тепловой защиты (далее - ТЗ) гидромеханических передач специального самоходного подвижного состава (далее - ССПС)

Задачи работы: сбор и анализ сведений о гидромеханических передачах ССПС; выявление основных причин перегрева гидромеханических передач ССПС; сравнительный анализ систем охлаждения гидромеханических передач самоходных машин; разработка вариантов ТЗ гидромеханических передач ССПС.

К ССПС относится железнодорожный подвижной состав для обслуживания устройств и оборудования железных дорог. Например, мотовозы типа МПТ применяют на погрузочно-разгрузочных работах, при перевозке рабочих бригад и грузов, при маневровых работах на станциях и для электропитания путевого инструмента. [1]

На современных типах специального самоходного подвижного состава, таких как автодрезины, мотовозы, автотрисы, применяются силовые гидромеханические передачи или, как их еще называют, – унифицированные гидромеханические передачи (далее – УГП). Гидромеханической называется силовая передача, в которой вращающий момент от двигателя передается к колесным парам как механически, так и гидравлическими элементами. Благодаря отсутствию жесткой связи между коленчатым валом дизеля и колесными парами двигатель не испытывает резких колебаний нагрузки, а возникающие крутильные колебания гасятся в передаче за счет дополнительного нагрева рабочей жидкости (далее – масла). Плавное изменение вращающего момента на ведущих колесах уменьшает их буксование при трогании с места, благодаря чему достигается значительное ускорение при разгоне машины. [2,3]

При повышении температуры в УГП происходит снижение производительности насосного блока. Блок-насос состоит из двух шестерённых насосов. Одним из недостатков такого типа насосов является недопустимость перекачивания чрезмерно текучего масла. Дело в том, что при работе УГП, масло нагревается, его вязкость падает и из-за этого производительность насосов снижается. При этом расход масла через теплообменный аппарат снижается, что влечет за собой дальнейший нагрев масла. В плунжерах клапанной коробки УГП имеются сливные отверстия диаметром 1,5 мм. Их засорение может привести к замедленному сливу масла из камеры плунжера, и как следствие - к перегреву одного из пакетов механизма фрикционов. При эксплуатации фрикционы стираются, и зазор между ними увеличивается, поэтому фрикционы при работе начинают пробуксовывать. Из-за дополнительного трения выделяется излишняя теплота, которую поглощает поток масла, идущий к плунжерам из золотниковой коробки. [2,3]

В УПП установлены насосы шестеренного типа, а гидромотор, который они питают - поршневой. Известно, что зубчато-роторные гидромашины работают менее эффективно на текучем масле, а поршневые наоборот - на вязком. Получается конструктивная несовместимость типов гидромашин. Ее можно решить кардинально заменой одной из гидромашин, например, насосов, либо менее кардинально - заменой масла, т.е подобрать такое масло, которое будет обеспечивать равные условия работа для обоих типов гидромашин.

В работе рассмотрены пять типов систем охлаждения гидромеханических передач самоходных машин: 1. Воздушная электромеханическая с регулируемым насосом; 2. Жидкостная не совмещенная с электромеханическим управлением; 3. Жидкостная не совмещенная с автоматическим управлением и регулируемым насосом; 4. Жидкостная автоматическая с регулируемым дросселем; 5. Жидкостная совмещенная с системой охлаждения моторного и трансмиссионного масел.

Выполнен сравнительный анализ рассмотренных систем охлаждения гидромеханических передач (Таблица 1). По совокупности принятых критериев сравнения (простота схемы, эффективность охлаждения масла, технологичность и стоимость изготовления системы) наиболее предпочтительным типом системы охлаждения для УПП ССПС является воздушная, электромеханическая система охлаждения с регулируемым насосом.

**Таблица 1. - Результаты сравнительного анализа систем охлаждения гидромеханических передач самоходных машин**

Критерии сравнения	Номер системы охлаждения				
	1	2	3	4	5
Простота схемы, у.е.*	2,5	3	1,5	1	1,5
Эффективность охлаждения, у.е.	3	1	2,5	2,5	1,5
Технологичность изготовления, у.е.	2	1,5	2,5	3	2,5
Стоимость изготовления, у.е.	1,5	2,5	1	1	1,5
Обобщенный показатель, у.е.	9	8	7,5	7,5	7
Приоритет применения	1	2	3	4	5

\*у.е. – «условная единица» (чем больше «у.е.» набирает система охлаждения при сравнении, тем она лучше)

Использование более вязкого масла позволит снизить падение производительности шестеренных насосов при увеличении температуры в УГП. Благодаря этому появляется возможность увеличить продолжительность работы УГП. Но если рассматривать этот способ ТЗ в зимний период эксплуатации машины, то существует вероятностью того, что насос не сможет прокачать чрезмерно вязкое масло. Поэтому потребуется сезонная замена или предварительный подогрев масла. У промышленных масел индекс вязкости (далее - ИВ) находится в диапазоне 80...90 единиц, а для УГП необходимы масла с ИВ более 100, например, загущенные масла с ИВ=110...200. Как правило, промышленные масла эксплуатируются при сравнительно низких температурах (50...60°C), поэтому в УГП их использование нежелательно. [4] Лучшая альтернатива маслам И-12А и И-20А являются их легированные аналоги ИГП-18 и ИГП-30 соответственно. Масла данной серии относятся к общим легированным маслам и являются полной заменой обычных, не легированных марок. Благодаря наличию присадок эти масла превосходят не легированные аналоги по защите от износа, стойкости к окислению, коррозионной устойчивости и антипенным характеристикам. Благодаря этому обеспечивается более длительная защита элементов гидросистем, эксплуатируемых при более высоких температурах и давлениях масла. [4] Проведенное сравнение вязкостно-температурных характеристик масел (Рисунок 1) показало, что использование масла И-12А в УГП не рекомендуется, т.к вязкость масла имеет высокую зависимость от температуры (недостаточный ИВ). Предпочтительным вариантом по соотношению стоимости и вязкостно-температурных характеристик является масло ИГП-18.

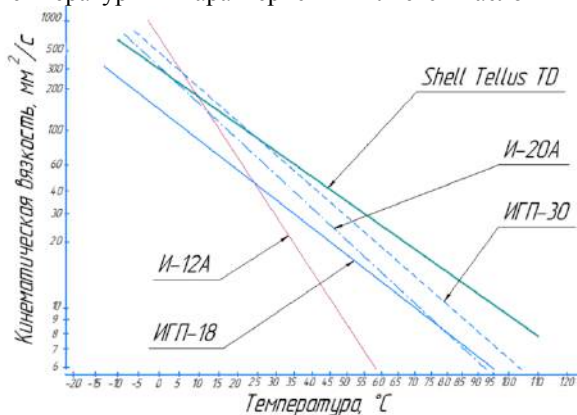


Рис. 1 – Сравнение вязкостно-температурных характеристик масел

Т.к. производительность шестеренчатых насосов падает со снижением вязкости масла, то увеличить время работы УГП можно установкой в насосный блок аксиально-поршневого насоса, который лучше функционирует на текучем масле. Таким образом, можно устранить проектную ошибку и обеспечить конструктивную совместимость насоса и гидромотора в УГП (Таблица 2).

**Таблица 2. - Минимально допускаемые для гидромашин значения вязкости при верхнем температурном пределе**

Тип гидромашин	Вязкость, сСт (условие обеспечения смазывающей пленки и КПД насоса $\eta=0,80\dots 0,85$ )
Поршневой (принятый тип)	6...8
Зубчато-роторный (замещенный тип)	16...18

Ввиду того, что аксиально-поршневые насосы стоят дороже и требуют более высокую тонкость фильтрации рациональнее установить дополнительный охлаждающий контур со своим насосом, датчиком температуры, теплообменником и гидромотором вентилятора. Реализация такого решения по силам любому эксплуатационному предприятию и позволит увеличить время работы УГП благодаря дополнительному отводу тепла из нее.

Литература:

1. Мотовоз погрузочно-транспортный МПТ-4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 77.02.1-00.000.04ТО.-М.: ПКТБ ЦП, 1996.
2. Гидропередача УГП 230-300. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 53-300А-ООТО. - Калуга: ОАО «Калугапутьмаш», 2004.
3. *Багажов В.В.* Силовые гидромеханические передачи специального самоходного подвижного состава: учебное пособие для профессиональной подготовки. – М.: Маршрут, 2006. – 88 с.
4. ГОСТ 20799-88. Масла индустриальные. Технические условия

# РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОТ ПРОМЕРЗАНИЯ

Г.А. Соболев, Н.А. Маслов

Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, [namaslov@mail.ru](mailto:namaslov@mail.ru)

Научный руководитель: Маслов Н.А., к.т.н., доцент

*В работе рассмотрена физика процесса промерзания пневмосистемы выправочно-подбивочно-рихтовочной машины, выявлены причины промерзания, предложены варианты способов защиты пневмосистемы от промерзания, выполнен сравнительный анализ предложенных способов по сформулированным критериям, даны рекомендации по выбору способа защиты пневмосистемы.*

*The paper considers the physics of the process of freezing of the pneumatic system of the straightening railway machine, identifies the causes of freezing, offers options for ways to protect the pneumatic system from freezing, performs a comparative analysis of the proposed methods according to the formulated criteria, gives recommendations on the choice of a method for protecting the pneumatic system.*

Целью работы является разработка способов защиты пневматической системы (далее - пневмосистемы) выправочно-подбивочно-рихтовочной машины Дуоматик 09-32 (далее - машины) от промерзания при зимней укладке железнодорожного пути и производстве аварийно-восстановительных работ при температурах окружающей среды ниже минимально рекомендуемой инструкцией по эксплуатации машины.

Задачи работы: рассмотреть физику процесса промерзания пневмосистемы, выявить причины промерзания; предложить варианты способов защиты пневмосистемы от промерзания; выполнить сравнительный анализ предложенных способов по сформулированным критериям; разработать рекомендации по выбору способа защиты пневмосистемы.

В пневмосистеме рассматриваемой машины после компрессора установлен осушитель воздуха, который удовлетворительно выполняет свою функцию при температуре от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$  [1,2]. Возможность промерзания пневмосистемы описывает термин «Точка росы» (значение температуры, при которой водяные пары, находящиеся в воздухе, конденсируют в росу). При температурах окружающего воздуха ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  образующийся при работе пневмосистемы конденсат интенсивно промерзает, тем самым внезапно останавливая работу пневмосистемы. Физика процесса промерзания такова. Хаотичный поток водяных частиц в потоке воздуха при соударении о стенки трубы упорядочивается. Частички склеиваясь, образуют более крупные частицы, которые в свою

очередь попадают в пневмоаппараты, что приводит к примерзанию запорнорегулирующих элементов к их корпусам.

Предложено три способа защиты пневмосистемы рассматриваемой машины от промерзания.

Первый способ заключается в увеличении диаметров пневматических трубопроводов для уменьшения размеров, склеивающихся при промерзании частиц влаги. Пневматическая система имеет достаточно развитую сеть трубопроводов и большое количество других элементов, поэтому замена трубопроводов не простая инженерная задача. Замена трубопроводов повлечет за собой изменение радиуса гибки и монтажа пневмолиний, а также замену других элементов. Подобные капитальные изменения конструкции пневмосистемы весьма затратные и, по своей сути, являются кардинальной переработкой, а не модернизацией пневмосистемы. Этот способ защиты пневмосистемы от промерзания применителен к вновь создаваемой машине, а не находящейся в эксплуатации, т.к. силами эксплуатирующей организации реализовать этот способ невозможно.

Второй способ защиты пневмосистемы от промерзания заключается в установке дополнительных осушителей воздуха в предполагаемых точках промерзания. Дополнительное осушение воздуха позволит максимально понизить его влажности в пневмолинии. Однако, не все так просто. Кондиционеры рабочей среды бывают разных конструктивных типов и необходимо подобрать соответствующий поставленной задаче. Например, фильтр-влагоотделитель работает следующим образом. Воздух попадает на лопастной ротор и, разгоняясь, ударяется об стенки корпуса. При этом частички влаги попадают на стенки и скатываются по ним вниз под силой тяжести во влагоприемник. Частично осушенный воздух под давлением идет через фильтрэлемент на выход фильтра-влагоотделителя. В конденсаторных осушителях влага из воздуха конденсируется путем охлаждения воздуха до точки росы. Основными элементами конденсаторных осушителей являются: вентилятор, компрессор, теплообменники (конденсатор и испаритель). Вентилятор направляет воздух через теплообменники. Температура витков испарителя ниже точки росы, что приводит к конденсации водяного пара на поверхности испарителя. Конденсат собирается в специальном поддоне внутри осушителя, или выходит через рукав давления наружу. После испарителя охлажденный и осушенный воздух проходит через конденсатор, где происходит нагрев. Это приводит к понижению уровня относительной влажности воздуха. Принцип работы адсорбционных осушителей основан на извлечении влаги из воздуха за счет впитывания ее гигроскопическими

материалами. Основными элементами таких осушителей являются: ротор, ременной привод, вентиляторы, нагревательный элемент, фильтр, корпус и дополнительные элементы. Ротор приводится в движение электродвигателем при помощи ременной передачи и состоит их двух секций: осушающей и регенерирующей. Поперек через ротор проходят два потока воздуха, которые изолированы друг от друга уплотнителями. Ротор медленно вращается и в это время часть ротора, обращенная к технологическому (обрабатываемому) воздуху, поглощает влагу из воздуха, а часть ротора, обращенная к нагретому (регенерируемому) воздуху, выделяет влагу, поглощенную из технологического воздуха.

Выполнен сравнительный анализ способов осушения воздуха (Таблица 1).

**Таблица 1. - Результаты сравнительного анализа способов осушения воздуха**

	Фильтр- влажготделитель	Конденсаторный осушитель	Абсорбционный осушитель
Стоимость, у.е.*	3	2	1,5
Сложность установки, у.е.	3	1	1
Сложность эксплуатации, у.е.	2	2	1
Производительность, у.е.	1	3	2
Обобщенный показатель, у.е.	9	8	5,5
«Занятое место»	1	2	3

\*у.е. – «условная единица» (чем больше «у.е.» набирает способ осушения воздуха, тем он лучше)

Результаты сравнения способов осушения воздуха показали, что самым нежелательным для практического применения является использование адсорбционного осушителя, т.к. в нем есть адсорбирующие вещество, которое нужно периодически заменять. Средние показатели имеет конденсаторный осушитель, но он имеет большие размеры, и могут возникнуть сложности с его вписыванием в габариты машины. Оптимальным вариантом является установка в пневмосистему машины дополнительного фильтра-влажготделителя или модернизация существующего осушителя.



Третьим способом защиты пневмосистемы от промерзания является установка нагревательных элементов перед пневмоаппаратами. Применительно только к рассматриваемому фрагменту рабочей тормозной пневмосистемы машины необходимо предусмотреть 22 точки установки нагревательных элементов [1-3]. Большинство этих точек распределены по длине машины. В каждой точке необходимо контролировать температуру и производить нагрев воздуха терморегулятами до точки росы. А так как температуру каждого нагревательного элемента необходимо задавать в соответствии с требуемой влажностью воздуха, то необходима дополнительная система контроля влажности воздуха.

Выполнен сравнительный анализ предлагаемых способов защиты рассматриваемой пневмосистемы от промерзания (Таблица 2).

**Таблица 2. - Результаты сравнительного анализа предлагаемых способов защиты пневмосистемы от промерзания**

	Дополнительный осушитель воздуха	Замена пневматических трубопроводов	Установка нагревательных элементов
Стоимость, у.е.*	3	1	1
Трудозатраты на установку оборудования, у.е.	3	1	1
Особенности эксплуатации, у.е.	2	3	2
Обобщенный показатель, у.е.	8	5	4
“Занятое место”	1	2	3

\*у.е. – «условная единица» (чем больше «у.е.» набирает способ защиты, тем он лучше)

Наилучшие показатели имеет установка в пневмосистему дополнительного осушителя воздуха. Этот способ защиты пневмосистемы от промерзания принят для дальнейшей глубокой проработки.

На основании полученных результатов анализа разработаны рекомендации по практическому выбору способа защиты пневмосистемы от промерзания. Рекомендации предполагается применять при модернизации находящихся в эксплуатации и создании новых путевых машин.

Литература:

1. 09-32 CAT. Spare parts catalogue. Part 1 / Plasser&Theurer – Linz, 2011. – 518p.
2. 09-32 CAT. Spare parts catalogue. Part 2 / Plasser&Theurer – Linz, 2011. – 489p.
3. Машина выправочно-подбивочно-рихтовочная Дуоматик 09-32. Каталог деталей и сборочных единиц / ОАО «Российские железные дороги». Проектно-технологическо-конструкторское бюро по пути и путевым машинам. - Москва, 2005. - 250с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МЕХАНИЗМОВ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА**

**Е.П. Чушкина, В.М. Григорьевская**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, chushkina\_2000@mail.ru**  
**Научный руководитель: Хромова И.В., к.т.н., доцент**

*В настоящей статье рассматриваются вопросы моделирования и расчета тепловых процессов в системе терморегуляции человека с учетом внутренних источников и переноса тепла между расчетными элементами и слоями. Исследуются механизмы работы системы терморегуляции при выполнении физической работы различной степени тяжести. Анализ полученных результатов позволяет дополнить эксперименты компьютерными исследованиями для совершенствования индивидуальных систем жизнеобеспечения и защиты человека от неблагоприятных внешних факторов.*

*This article discusses the issues of modeling and calculating thermal processes in the human thermoregulation system, taking into account internal sources and heat transfer between the calculated elements and layers. The mechanisms of operation of the thermoregulation system when performing physical work of varying severity are investigated. The analysis of the obtained results makes it possible to supplement the experiments with computer studies for improvement of individual life support systems to protect a person from adverse external factors.*

Сегодня одной из актуальных научно-прикладных задач является разработка физико-математических моделей живых систем. Данная задача имеет большое прикладное значение в области разработки и оптимизации элементов систем жизнеобеспечения в области безопасности космических полетов. Одна из этих задач - обеспечение теплового комфорта для человека в рамках системы «человек –

окружающая среда». В частности, это относится к защите человека от переохлаждения и перегрева: при аварийном отключении систем кондиционирования, приземлении (или приводнении) экипажа в неблагоприятных климатических условиях. Кроме того, во время работы в открытом космосе космонавты подвергаются тяжелым физическим и тепловым нагрузкам в замкнутом герметичном объеме скафандра.

Целью настоящей работы является исследование работы механизмов системы терморегуляции человека при различной величине физической нагрузки.

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. Для расчета тепловых процессов используется система нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности для каждого расчетного элемента. Учитываются тепловые процессы, которые происходят в каждом слое расчетного элемента. Кровеносная система работает совместно с системой терморегуляции и осуществляет перенос тепла от внутренних органов к поверхности тела.

Когда человек выполняет физическую нагрузку на Земле, лишнее тепло от внутренних органов сбрасывается в окружающую среду через кожу (до 90 %). Система подкожных капилляров при этом работает как слой активной теплоизоляции. В случае перегрева объемный расход крови (теплоносителя) через кожу увеличивается. Тогда термическое сопротивление кожи уменьшается. И наоборот: при переохлаждении кровь «выдавливается» из оболочки к внутренним органам и термическое сопротивление кожи увеличивается. Учет особенностей работы механизмов системы терморегуляции при выполнении физической нагрузки может быть полезен для усовершенствования системы управления климат-контроля скафандров.

Для иллюстрации тепловой задачи расчеты проводятся для трех вариантов мощности: 0 Вт (состояние покоя), 300 Вт и 900 Вт (рис. 1). Температура окружающей среды – 24 °С, величина внутреннего метаболизма 90 Вт. Чем больше мощность внутренних источников тепла, которые вызваны физической нагрузкой, тем интенсивнее теплоотдача в окружающую среду и выше средняя температура ядра. Но величина теплоотдачи расчетных элементов различна: интенсивнее всего при физической нагрузке тепло отдают ноги и грудная клетка. Это необходимо учитывать при проектировании систем тепловой защиты.

В работе также проводится исследование работы механизмов системы терморегуляции и величины теплопотерь при выполнении физической работы в условиях низких температур.

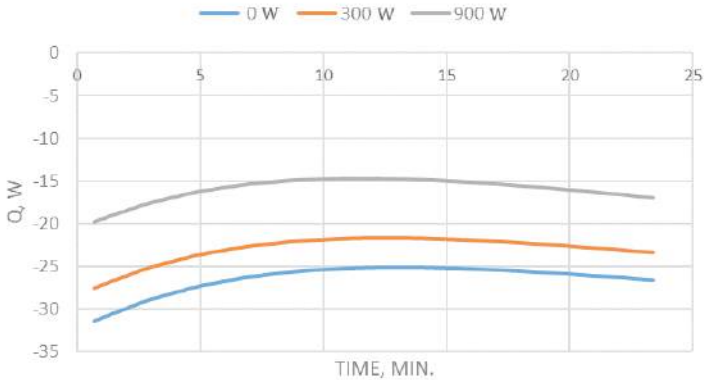


Рис. 1. – Суммарная теплоотдача организма при различной нагрузке

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.

#### Литература:

1. 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).
2. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
3. 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.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ В ОДИНОЧНОЙ ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКЕ

Ян Лун Никита<sup>1,2</sup>, И.Н. Баранов<sup>2</sup>, В.И.Терехов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, yln1999@mail.ru

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, 630090, Россия,  
г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

*В работе описана методика и результаты экспериментального исследования распределения скорости в канале с овальной траншейной лункой (ОТЛ). Траншейная лунка в поперечном сечении представляет собой цилиндрический сегмент на одной из стенок плоского канала. Эксперименты проведены при неизменном числе Рейнольдса  $Re_D = 2,1 \cdot 10^4$  и при углах наклона относительно продольной оси канала  $\phi = 0^0$  и  $\phi = 45^0$*

*The paper describes the technique and results of an experimental investigation of the velocity distribution over the surface of an oval trench dimple (OTD). The trench dimple in cross-section is a cylindrical segment on one of the flat channel walls. The experiments were carried out with a constant Reynolds number  $Re_D = 2.1 \cdot 10^4$  and at the inclination angle relative to the longitudinal axis of the channel  $\phi = 0^0$  and  $\phi = 45^0$*

### Введение

При создании современных теплообменных аппаратов одним из наиболее важных параметров, наряду с обеспечением их компактности, простоты и надежности в работе, является величина теплогидравлической эффективности. Значение данного параметра определяется отношением уровня интенсификации теплообмена к росту гидравлических потерь. Существует достаточно много способов увеличения теплосъема с единицы теплообменной поверхности за счет ее модификации с помощью различных преград и каверн, однако при этом, как правило, гидравлические потери растут гораздо быстрее, чем теплоотдача [1,2]. Сильные эффекты интенсификации теплообмена дают так называемые овально-траншейные лунки (ОТЛ), представляющие собой удлиненную цилиндрическую траншею с полусферическими закруглениями на ее краях. Как показали численные исследования работ [5,6], ОТЛ дают опережающий рост теплопередачи в сравнении с гидравлическими потерями и данный эффект авторы назвали аномальной интенсификацией теплообмена.

### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на рисунке 1

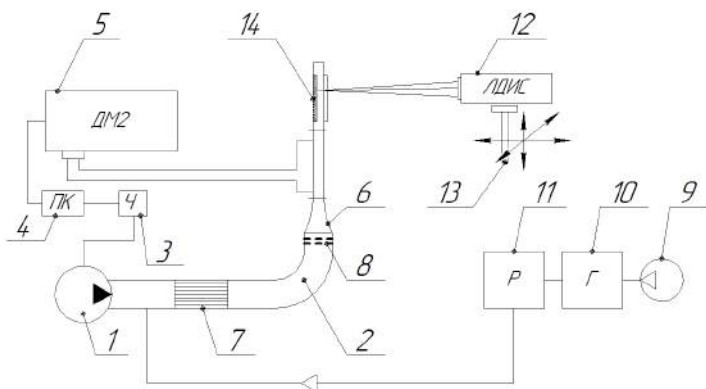


Рис.1 – Схема экспериментального стенда

1-вентилятор,2-поворотный канал,3-частотный преобразователь,4-компьютер,5-дифференциальный манометр ДМ2,6-сопло Витошинского,7-хонейкомб,8-выравнивающие поток сетки,9-компрессор,10-генератор,11-ресивер,12- лазерно-доплеровским измеритель скорости,13-координатное устройство,14- поворотный круг

Все эксперименты были проведены при фиксированной среднерасходной скорости в канале  $u_m = 20$  м/с, чему соответствовало число Рейнольдса, рассчитанное по ширине траншеи  $Re_D = 2,1 \cdot 10^4$  или по гидравлическому диаметру канала  $Re_{ch} = 4,7 \cdot 10^4$ .

### Результаты

Измерения проводились при углах наклона траншей к направлению потока  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 45^\circ$ . Результаты измерений распределения скорости в центре траншеи, демонстрируются на рис. 2.

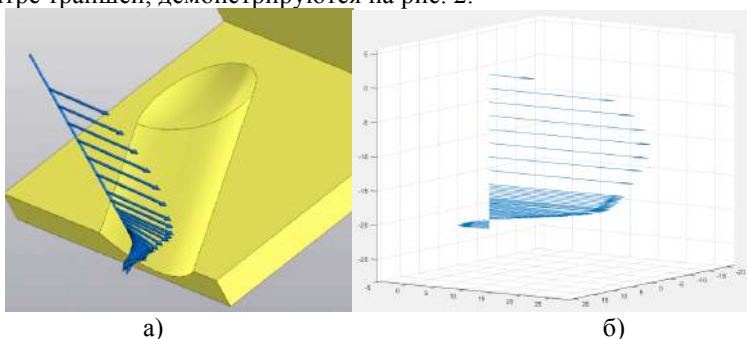


Рис.2 – Распределение скоростей в центре лунки при ориентации лунки к потоке : а)  $\varphi = 45^\circ$  б)  $\varphi = 0^\circ$

Видно, что во всех двух случаях в основном потоке вектора скорости ориентированы вдоль оси канала, и значения скоростей вполне соответствуют значениям в плоском канале. Однако, внутри лунки поведение скорости разное.

При  $\varphi = 0^0$  внутри лунки наблюдается рециркуляционное течение, максимум скорости которого составляет 19 % от максимальной скорости в ядре потока. При этом все вектора лежат в одной плоскости. Поведение лунки при таком расположении напоминает комбинацию обратного и прямого уступов равной высоты.

При  $\varphi = 45^0$  внутри лунки происходит разворот течения. Внутреннее течение ориентировано вдоль оси траншеи.

Сравнение профилей продольной скорости в сечениях на краю лунки и в центре при  $\varphi = 0^0$  приведено на рисунке 3. Отрыв потока происходит при  $Z=-6,0$  мм, затем наблюдается обратный ток внутри лунки. Он продолжается до  $Z=+4,0$  мм, затем поток присоединяется. Профили за лункой и до лунки практически совпадают.

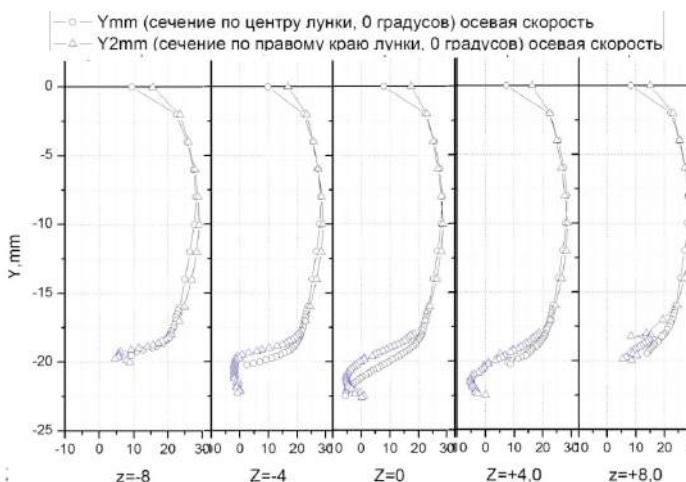


Рис. 3 - Сравнение профилей продольной скорости в сечениях на краю лунки и в центре при  $\varphi = 0^0$

### Заключение

Проведено комплексное исследование полей скорости в лунке. Установлено, что влияние лунки на течение в потоке ограничивается несколькими миллиметрами. Профили в ядре потока же совпадают друг с другом.

Для углов наклона оси лунки относительно оси канала  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 45^\circ$  течение ведет себя различно. Для  $\varphi = 0^\circ$  течение плоское, в центре лунки ярко выраженное рециркуляционное течение. Для  $\varphi = 45^\circ$  рециркуляционного течения нет, поток внутри лунки просто разворачивается вдоль оси траншеи.

#### Литература:

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990 (In Russian).
2. Ligrani P. Heat Transfer Augmentation Technologies for Internal Cooling of Turbine Components of Gas Turbine Engines // *Int. J. of Rotating Machinery*. 2013. Article ID 275653, 32 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/275653>
3. Rashidi S. Hormozi F., Sundén B., Mahian O. Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology – a review on mechanisms and applications // *Applied energy*. 2019. V. 250. 15. PP. 1491-1547 <https://DOI.ORG/10.1016/J.APENERGY.2019.04.168>
4. Terekhov V.I., kalinina S.V., Mshvidobadze YU.M. A review on heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // *J. Enhanced heat transfer*, 2017, V. 24. IS. 1-6, pages 411-426, DOI: 10.1615/JENHHEATTRANSF.V24.I1-6.300
5. Isaev S.A., A.I. Leontiev, O.O. Milman, D.V. Nikushchenko NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2019, T. 145. C. 118737.
6. Isaev S.A., Gritkevich M.S., Leontiev A.I., Popov I.A, Sudakov A.G. Anomalous Intensification of a Turbulent Separated Flow in Inclined, Single-Row, Oval-Trench Dimples on the Wall of a Narrow Channel. *High Temp*. 2019. v. 57, pp. 771–774. <https://doi.org/10.1134/S0018151X19040084>
7. Исаев С.А, Синявин А.А. Отчет о НИР, 2020, Ст-ПУГА.
8. Guvernyuk S.V., Chulyunin A.Y Metastable separated structures in turbulent flow around circular and oval dimples//*Tech. Phys. Letters*, 2019. vol. 45. No 9. pp. 894-897
9. Terekhov V.I., Kalinina S.V. & Mshvidobadze Y.M. Pressure field and resistance of a single cavity with sharp and rounded edges. *J. Appl. Mech. Tech. Phys*. 1993 34, 331–338 <https://doi.org/10.1007/BF00864784>



**СИНТЕЗ ЗОЛЬКЕТАЛЯ ИЗ ГЛИЦЕРИНА И АЦЕТОНА  
В ПРИСУТСТВИИ ФОЖАЗИТА**

**А.И. Аркадьева<sup>1</sup>, А.В. Токтарев<sup>2</sup>, В.Н. Панченко<sup>1,2</sup>**

**<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет,**

**<sup>2</sup>Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск,**

**aaarkadyeva@gmail.com**

**Научный руководитель: Тимофеева М.Н., д.х.н., доцент**

*В работе приведены результаты исследования каталитических свойств фожазита (FAU) с цеолитным модулем (Si/Al) 14.9, 97 и 810 в реакции синтеза золькетала из глицерина и ацетона. Показано, что выход золькетала выше в присутствии FAU(97) по сравнению с FAU(14.9), что связано не только с изменением природы кислых центров и текстурных характеристик.*

*Catalytic properties of Faujasite (FAU) with a zeolite module (Si/Al) 14.9, 97 and 810 were investigated in the synthesis of a solketal from glycerol and acetone. The yield of solketal was found to be higher in the presence of FAU(97) in comparison with FAU(14.9) that was explained by the change in the nature of acidic centers and textural properties.*

В последние десятилетия в связи с удорожанием ископаемых углеводородов и ухудшением экологической обстановки значительное внимание уделяется использованию глицерина в качестве строительного блока для получения широкого спектра химических веществ. Особый интерес имеет получение золькетала (2,2-диметил-4-гидроксиметил-1,3-диоксолан, II, рис. 1), который используется в качестве оксигенатной добавки, органического растворителя, пластификатора и как интермедиат для синтеза широкого спектра фармацевтических продуктов.

Впервые золькеталь был получен в 1895 г. по реакции глицерина с ацетоном в присутствии хлористого водорода (рис. 1). С тех пор предложено много как гомогенных, так и гетерогенных катализаторов. Так же была показана возможность применения цеолитов (H-ZSM-5, USY, б-цеолит) в качестве катализаторов. Однако, в целом их эффективность была не высокой.

Целью данной работы было изучение возможности применения фожазита (цеолитная топология FAU) с цеолитными модулями (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 14.9, 97.0 и 810 в качестве катализатора реакции синтеза

золькаталя из глицерина и ацетона (рис. 1), а также установить основные факторы, позволяющие варьировать их каталитические свойства путем изменения химического состава и текстурных свойств

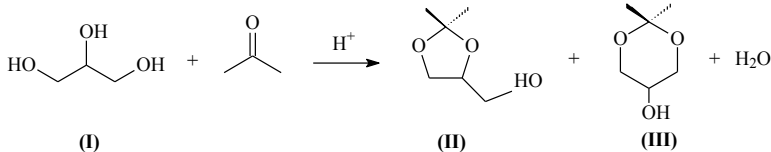


Рис.1 – Реакция ацетализации глицерина с ацетоном

В работе использовали фожазит производства японской компании Tosoh Corporation. Текстурные свойства материалов приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Текстурные свойства фожазита**

Катализатор	$S_{\text{ВЕТ}}$ ( $\text{м}^2/\text{г}$ )	$S_{\text{внеш}}$ ( $\text{м}^2/\text{г}$ )	$V_{\Sigma}$ ( $\text{см}^3/\text{г}$ )	$V_{\mu}/V_{\Sigma}$
FAU(14.9)	858	61	0.50	0.48
FAU(97.0)	1032	126	0.63	0.50
FAU(810)	1093	102	0.77	0.52

Исследование методом ИК спектроскопии изменения, происходящие в результате деалюминирования, показали, что с увеличением цеолитного модуля изменяется количество силанольных -ОН групп. Это следовало из изменения отношения интенсивностей полос, характеризующих колебания силанольных групп -Si-OH ( $937 \text{ см}^{-1}$ ) и симметричные валентные колебания связи Si-O в тетраэдре  $\text{SiO}_4$  ( $873 \text{ см}^{-1}$ ). Изменение количества Si-OH групп влияет на адсорбционные свойства фожазита. Так, величина адсорбции глицерина снижается с уменьшением их количества (табл. 2).

**Таблица 2 – Кислотные и адсорбционные свойства фожазита**

Катализатор	Кислотные свойства		$\alpha$ ( $\text{мг}/\text{г}$ )
	БКЦ ( $\text{ммоль}/\text{г}$ )	РА (кДж/моль)	
FAU(14.9)	0.116	1167	113
FAU(97.0)	0.081	1200	90
FAU(810)	<0.001	1215	24

Количество и сила кислых центров в фожазите была определена методом ИК спектроскопии с использованием пиридина в качестве

молекулы-зонда. Как видно из данных приведенных в таблице 2, с увеличением цеолитного модуля с 14.9 до 810 сила кислых центров снижается с 1167 до 1215 кДж/моль. Одновременно с этим снижается и количество Бренstedовских кислотных центров (БКЦ).

Каталитические свойства фожазита были изучены при мольном отношении ацетон/глицерин равном 2.5, загрузке катализатора 1.7 масс.% (в расчете на глицерин) и температуре 50°C. Для гомогенизации системы в раствор добавляли небольшое количество метанола (1 мл MeOH на 1 г глицерина). Присутствие метанола в реакционной смеси не оказывает существенного влияния на скорость реакции и выход золькетала, в отличие от воды, которая резко тормозит процесс.

Согласно полученным данным реакция в присутствии фожазита протекает гетерогенно. На это указывал тот факт, что после удаления катализатора реакция не протекала. Основными продуктами реакции были золькеталь с пятичленным циклом (II) и кеталь с шестичленным циклом (III) (табл. 3). Максимальная селективность по (III) наблюдается в начале реакции, а затем она снижается из-за его изомеризации в (II), что согласуется с механизмом реакции.

**Таблица 3 – Каталитические свойства фожазита**

Катализатор	Время (мин)	Конверсия (I), (%)	Селективность, (%)	
			(II)	(III)
FAU(14.9)	10	29.2	86.6	13.4
	90	47.2	93.3	6.7
FAU(97.0)	10	43.9	88.4	11.6
	90	59.4	94.1	5.9
	120	61.3	94.6	5.4
FAU(810)	90	17.2	96.3	3.7

Показано, что с увеличением цеолитного модуля в результате dealюминирования цеолитного каркаса фожазита скорость реакции и выход (II) проходит через максимум (табл. 3). Это можно объяснить изменением как кислотных и текстурных свойств фожазита с изменением цеолитного модуля. Высокие конверсия глицерина и выход золькетала в присутствии FAU(97.0) по сравнению с FAU(14.9) связаны, главным образом, изменением текстурных характеристик, влияющих на доступность реагентов к активным центрам (табл. 1). Увеличение  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  с 14.9 до 97 приводит к росту величины удельной поверхности с 858 до 1032 м<sup>2</sup>/г и доли внешней поверхности ( $S_{\text{внеш}}/S_{\text{БЭТ}}$ ) с 0.078 до 0.12 (табл. 1). Снижение конверсии глицерина и выхода золькетала в присутствии FAU(810) можно объяснить двумя

причинами. Прежде всего, это связано как со снижением количества и силы кислых центров. С другой стороны, это объясняется ростом микропористости системы ( $V_{\mu}/V_{\Sigma}$ ), что приводит к росту стерических ограничений и снижению доступности расположенных в суперполюсти активных центров для реагентов.

## **ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ ЦИАНИДОВ**

**Бармакова У.Ю., Ларичкина Н.И., Кадимова А.В.**  
**Новосибирский государственный технический университет**  
**г. Новосибирск, e-mail [ubarmakova@gmail.com](mailto:ubarmakova@gmail.com),**  
**[larichkina@corp.nstu.ru](mailto:larichkina@corp.nstu.ru)**

*Гальваническое производство является одной из основных операций в машиностроении и позволяет значительно улучшить механические свойства и улучшить внешний вид материалов, что позволяет повысить их надежность в эксплуатации и повысить их конкурентоспособность. Однако при нанесении гальванопокрытий образуется достаточно большой объем сточных вод, которые наряду с тяжелыми металлами могут содержать высокотоксичные соединения (цианиды). При выборе способа очистки сточных вод, как правило, в большей степени обращают внимание на экономичность выбранного метода. Однако, учитывая тенденции всего мирового сообщества в области охраны окружающей среды, немаловажную роль играет и выбор экологически чистых методов. На основании эколого-экономических показателей методов очистки сточных вод от цианидов в работе была разработана схема очистки сточных вод от цианидов, состоящая из трех ступеней очистки методом хлорирования и одной - озонирования. Показано, что экономическая эффективность предлагаемого метода составляет 0,254 руб./руб., а срок окупаемости примерно 4 года.*

*Electroplating is one of the main operations in mechanical engineering and allows you to significantly improve the mechanical properties and improve the appearance of materials, which allows you to increase their reliability in operation and increase their competitiveness. However, when electroplating is applied, a sufficiently large volume of wastewater is formed, which, along with heavy metals, may contain highly toxic compounds (cyanides). When choosing a method of wastewater treatment, as a rule, more attention is paid to the efficiency of the chosen method. However, considering the trends of the entire world community in the field of environmental protection, the choice of environmentally friendly methods also plays an important role. Based on the ecological and economic indicators of the methods of wastewater treatment from cyanides, a scheme of wastewater treatment from cyanides*

*was developed in the work, consisting of three stages of purification by chlorination and one by ozonation. The economic efficiency of this method is 0.254 rub / rub, and the payback period is approximately 4 years.*

На современном этапе развития промышленности полный отказ от технологий, в результате которых образуются сточные воды, содержащие вредные вещества, невозможен. Поэтому вопрос очистки сточных вод является *актуальным*. При выборе метода очистки наряду с экономическими показателями очень важную роль играет эффективность выбранных методов очистки, способная удовлетворять нормативные требования.

*Целью работы* являлось разработка метода очистки сточных вод, который не только позволит очистить их до уровня ПДК, но и будет экономически целесообразен.

Цианид представляет собой химическое соединение, которое содержит цианогруппу ( $C\equiv N$ ), где углерод находится в промежуточной степени окисления [1]. Для очистки сточных вод от данных соединений чаще всего применяют окислительные методы, так как, окисляясь, цианиды переходят в менее токсичные вещества цианаты, а затем при регулировке pH сточных вод полностью удаляются из системы. В качестве реагентов для химического окисления наиболее широко применяют хлор, а также пероксид водорода и озон [2]. Выбор реагента в большей степени определяется значением pH сточных вод, поступающих на очистку.

В работе, на примере содержания цианидов ( $C(CN)^-$  = 22,4 мг/л) в виде комплексного соединения тетрацианоферрат(II) калия ( $Na_4[Fe(CN)_6]$ ), содержащегося в щелочных сточных водах (pH=8,9) гальванического производства, был осуществлен выбор оптимальных методов очистки сточных вод гальванического производства, а именно: окисление хлором и озоном. Результаты исследований показали, что для очистки сточных вод от цианидов методом хлорирования, эффективность которого составляет около 60%, до уровня ПДК (0,05 мг/л, при сбросе их на доочистку в городскую канализацию) требуется 7 стадий очистки. При этом концентрация хлоридов возрастает, что в дальнейшем потребует дополнительную очистку от них.

Расчет экономических показателей очистки сточных вод методом хлорирования показал, что капитальные вложения составят 2680850 руб., себестоимость очистки одного кубического метра - 42,8 руб., а экономическая эффективность - 0,55 руб./руб., срок окупаемости - около 2-х лет (рис. 1) [3].

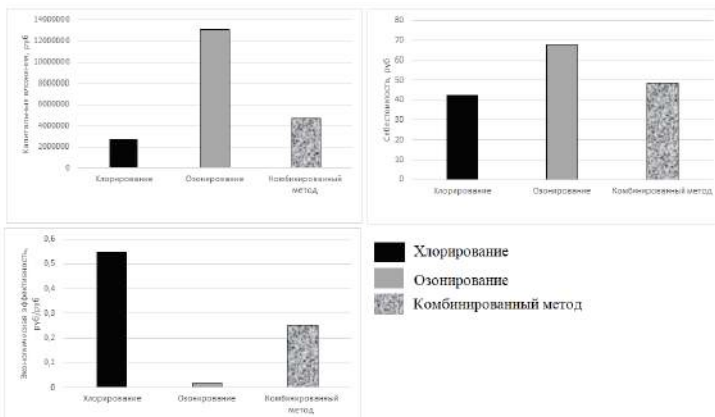


Рис. 1 - Сравнение показателей капитальных вложений, себестоимости очистки и экономической эффективности методов очистки сточных вод от цианидов

Однако метод хлорирования обладает существенным недостатком, а именно: при очистке хлорированных вод от стадии к стадии увеличивается содержание хлоридов, что требует дополнительной очистки от них и значит увеличению себестоимости процесса.

При очистке сточных вод от цианидов озонированием, благодаря высокой эффективности этого метода (98%), потребуется 2 степени очистки. Но данный метод является достаточно дорогостоящим, поэтому капитальные вложения и себестоимость очистки возрастут в 5 и 1,6 раза соответственно, а экономическая эффективность снизится в 29 раз. Срок окупаемости данного метода значительно увеличится (рис. 1).

Учитывая химические особенности и экономические показатели этих двух методов, была разработана схема очистки сточных вод от цианидов, включающая три степени хлорирования и одну степень озонирования (рис. 2). Это позволит достичь остаточной концентрации цианидов 0,029 мг/л, что ниже ПДК, а дополнительное насыщение вод кислородом позволит улучшить их качество. Капитальные вложения и срок окупаемости по сравнению с методом хлорирования возрастут примерно в 2 раза (4716503 руб. и 3,94 лет соответственно), себестоимость увеличится незначительно и составит 48,6 руб., а экономическая эффективность уменьшится в 2 раза (0,254 руб./руб.). По сравнению с методом озонирования капитальные вложения, себестоимость и срок окупаемости снизятся в 3, 1,5 и 2 раза соответственно, а эффективность возрастет в 13 раз (рис. 1).

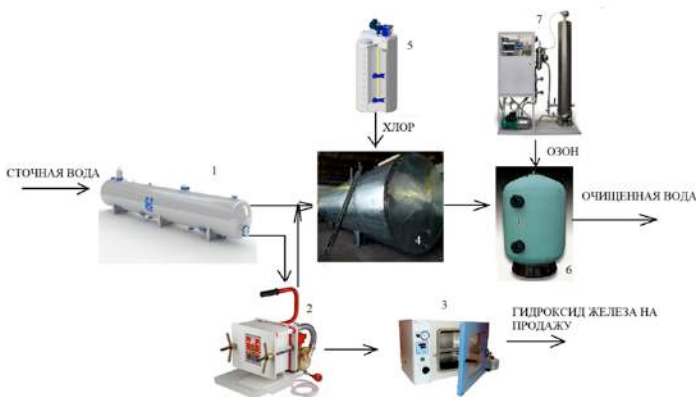


Рис. 2 – Схема очистки сточных вод методом, совмещающим в себе хлорирование и озонирование: 1 – отстойник; 2 – фильтр-пресс; 3 – сушильный шкаф; 4 – реактор; 5 – узел приготовления реагентов; 6 – контактная камера; 7 – станция озонирования

Таким образом, при выборе метода очистки сточных вод учет экономических показателей позволяют разработать наиболее эффективную схему, которая дает возможность повысить качество очищенных вод и снизить экономические затраты.

#### Литература

1. Глоссарий названий классов органических соединений и промежуточных продуктов реакционной способности на основе структуры (Рекомендации IUPAC 1995) [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://www.goldbook.iupac.org/terms/view/C01486> (дата обращения 11.10.2020).

2. Кольцов В.Б. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: Учебник и практикум для академического бакалавриата. – Москва: Изд-во Юрайт, 2018. – С. 106-109.

3. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды" (одобрена Постановлением Госплана СССР, Госстроя СССР, Президиума АН СССР от 21.10.1983 N 254/284/134) [Электронный ресурс] – Электронные данные. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/vremennaja-tipovaja-metodika-opredelenija-ekonomicheskoi-effektivnosti-osushchestvlenija-prirodookhrannykh-meroprijatii/> – Дата обращения: 12. 05.2021.

## РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ДООЧИСКИ ШАХТНЫХ ВОД

**Ю. И. Бондаренко, О.Ю. Бородина**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, yuliya001509@gmail.com**

*В работе рассматривается актуальность вопроса загрязнения природных вод недостаточно очищенными сбросами шахтных вод. Для разработки схемы очистки шахтных вод, анализируются исходные данные. На основе этого анализа, предлагаются схемы по доочистке шахтных сточных вод.*

*This paper considers the relevance of the issue of pollution of natural waters insufficiently treated discharges of mine water. To develop a scheme of treatment of mine water, the initial data are analyzed. Based on this analysis, schemes for additional treatment of mine effluents are proposed.*

Россия является одной из лидирующих стран в сфере угольной промышленности, так как в ее недрах хранится 1/3 часть мировых запасов угля. Угольная отрасль оказывает большое влияние на энергобаланс страны. Наряду с этим, угледобыча оказывает немалое негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Опасность для окружающей среды представляют предприятия, которые занимаются непосредственно добычей угля.

За весь период своей деятельности, угледобывающие предприятия избавляются от большого количества техногенных отходов, преобладающую часть которых составляют шахтные воды. Под шахтными водами обычно понимаются все воды, проникающие в горные выработки и проходящие через водоотлив шахты. Из всего объема шахтных вод, всего лишь 13-15% используется для нужд угольного предприятия, остальные 85-87% сбрасываются в поверхностные воды. Сброс большого количества неочищенных шахтных вод, приводит к нарушению равновесия региональных вод, а именно заилению, засолению, закислению водоемов и водотоков. Перед тем как попасть в водные ресурсы, шахтные воды очищаются, однако, этой очистки очень часто недостаточно [1].

В настоящее время проектный институт ООО «Гипроуголь» разрабатывает проектную документацию схемы доочистки шахтных вод, заказчиком выполнения работ выступает ООО «ММК-УГОЛЬ» шахта «Костромовская». По административному делению поле шахты «Костромовская» расположено на территории муниципального образования Ленинск-Кузнецкого района Кемеровской области. Шахта, построенная по современным технологиям в 2008 году, ведет добычу ценного коксующегося угля марки Ж. Продукция шахты высоко



востребована на рынке и является сырьем для производства угольного концентрата, который ООО «ММК-УГОЛЬ» поставляет материнской компании ПАО «ММК».

Для разработки проектной документации схемы доочистки шахтных вод приняты следующие исходные данные: техническое задание на выполнение работ, инженерно-экологические изыскания территории расположения объекта, топографическая съемка, производительность очистных сооружений, которая составляет более 4500 тыс. м<sup>3</sup>/год, качественный и количественный состав загрязняющих веществ на выходе из существующих очистных сооружений.

Очистные сооружения, имеющиеся на угольном предприятии, не обеспечивают очистку шахтных вод до нормативных требований для сброса в водный объект рыбохозяйственного назначения - ручей Лог Сухой и связано это с несовершенством применяемых в настоящий момент схем очистки.

В настоящее время очистка сточных вод, на существующих очистных сооружениях шахты «Костромовская», производится за счет механического отстаивания и фильтрования поступающих шахтных вод. После этапов отстаивания и фильтрации, шахтные воды обеззараживают, и затем часть используется для производственно-пожарного водоснабжения, а оставшаяся часть сбрасывается в ручей Лог Сухой. На рисунке 1 представлена существующая технологическая схема очистки шахтных вод шахты «Костромовская».



Рис. 1 - Существующая технологическая схема очистки шахтных вод шахты «Костромовская» Ленинск-Кузнецкого района Кемеровской области.

Шахтные воды имеют достаточно сложный и разнообразный химический состав, который обуславливается влиянием естественных процессов, происходящих в горных выработках, водоносных горизонтах, при контакте шахтных вод с углем и вмещающими в него породами. Имеющиеся в составе шахтных вод, концентрации примесей, значительно превышают нормы предельно допустимых концентрации (ПДК) рыбохозяйственного назначения [2].

Для оценки эффективности применяемой технологической схемы очистки, вводят маркерные вещества, которые по определенным критериям, выбираются для группы веществ. К маркерным веществам, для оценки очистки шахтных вод, относятся нефть и нефтепродукты, железо, взвешенные вещества и показатель – кислотности воды (рН).

В качестве исходных данных, для разработки проектной документации ООО «ММК-УГОЛЬ» шахта «Костромовская», были представлены характеристики качества шахтных вод после предоставления очистки на существующих очистных сооружениях. Из усредненных показателей качества (таблица 1) видно, что содержание характерных для данной категории маркерных стоков веществ, превышает нормативы предельно допустимой концентрации для сброса в водоем рыбохозяйственного значения.

**Таблица 1 – Показатели качества шахтных вод после очистки**

№ п/п	Наименование вещества	Концентрации загрязняющих веществ на выходе из существующих очистных сооружений, мг/дм <sup>3</sup>	ПДК рыб.хоз. значения, мг/дм <sup>3</sup>
1	БПК <sub>полн.</sub>	3,323	3,0
2	Взвешенные вещества	200,0	20,0
3	Железо общее	0,298	0,1
4	Марганец	0,025	0,01
5	Медь	0,002	0,001
6	Нефтепродукты	0,141	0,05

Перед проектным институтом ООО «Гипроуголь» поставлена задача, направленная на поиск и разработку экологически эффективной, экономически выгодной схемы очистки шахтных вод от загрязняющих компонентов с сохранением уже имеющейся схемы очистки.

Для разработки схемы очистки рассматриваются исходные данные, а также информация, представленная в справочниках, научно-технической, патентной литературе, периодических изданиях.

Основополагающим, в поиске способов и методов очистки, является информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (НДТ) ИТС 37-2017 «Добыча и обогащения угля».

Использование рекомендаций НДТ позволит комплексно очищать воду до соответствия санитарно-гигиеническим нормативам и сбрасывать ее в природные водоемы. Более того, применение НДТ позволит использовать вторично отработанную воду в промышленных и технологических целях предприятия.

Предпочтительно, в области очистки образующихся шахтных вод, использовать такие НДТ, как базовая очистка, обеззараживание сточных вод и физико-химическая очистка сточных вод [3]. Первые две являются более упрощенными системами очистки, усложненный вариант - физико-химическая очистка шахтных вод. При такой схеме очистки, шахтные воды после отстойников поступают на насосно-фильтровальную станцию с обеззараживающими установками. Применение физико-химической очистки, позволит достичь более глубокого удаления ряда загрязняющих веществ.

На данный момент, большинство угольных предприятий Кузбасса ввели в эксплуатацию новые системы доочистки шахтных вод. Одной из таких систем является установка мембранной микрофильтрации, которая позволяет провести доочистку сточных вод и снизить концентрацию взвешенных веществ до  $1 \text{ мг/дм}^3$ , железа, марганца, солей тяжелых металлов, нефтепродуктов и сложных молекулярных соединений [4]. Еще один пример внедренной системы очистки – это технология динамического осветления воды, которая позволяет снизить сбросы по взвешенным веществам, тяжелым металлам (в том числе железо, никель, свинец), органическим соединениям и добиться нормативных показателей допустимого воздействия.

Кроме прочих систем, на основе имеющихся научных разработок, проектировщиками схемы очистки образующихся шахтных вод, рассматриваются варианты очистки при помощи альтернативных, нетрадиционных способов. Примером одного рассматриваемого варианта является применение сорбционных материалов на основе модифицированных промышленных отходов.

Таким образом, для разработки эффективной схемы доочистки шахтных вод шахты «Костромовская» необходимо провести анализ наших предложений, производительности уже внедренных систем

доочистки, а также сравнение финансовых расходов предприятий на реализацию этих проектов.

Литература:

1. Попова Д.С. Экологические проблемы угледобывающих регионов России [Электронный ресурс]// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – № 8-1. – 2017. -URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11773> (дата обращения: 13.10.2021).
2. Дьяков Е. В., Ворон Л.В. Очистка шахтных вод // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2012. - Ч. 3. - Вып. 16. - С. 54 – 58.
3. ИТС 37-2017. Добыча и обогащение угля. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 301 с.
4. Вода станет чище // Уголь Кузбасса. – 2015. – №6. – С. 52.

## **ВЛИЯНИЕ СИЛИКОНОВОЙ ЖИДКОСТИ ДЕМПФЕРА НА КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, КАК ОДНА ИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ**

**О.Ю. Бородина<sup>1</sup>, С.С. Глушков<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [VorodinaOYu@mail.ru](mailto:VorodinaOYu@mail.ru)**

**<sup>2</sup>ООО «Мидель», г. Новосибирск**

*В работе рассматривается влияние силиконового демпфера валовых линий судовой энергетической установки (СЭУ) на причину возникновения аварийной ситуации на водном транспорте.*

*The article discusses the effect of the silicone damper of the gross lines of a ship power plant (SEU) on the cause of an emergency on water transport.*

Валопровод судовой энергетической установки (СЭУ) является упругой системой, работающей в условиях периодически изменяющихся нагрузок – сил вращающихся моментов. В результате действия этих нагрузок в валопроводе возникают колебания нескольких видов: крутильные, осевые и изгибные.

В судовых дизельных установках коленчатый вал и валопровод являются одним из напряженных деталей, на которых концентрируется

вся энергия. Чаще всего повреждение этих деталей происходит по мере развития усталостных повреждений через  $(7-8) \cdot 10^6$  циклов колебаний.

Развитие крутильных колебаний может привести к разрушению коленчатых валов дизелей, гребных валов, ослаблению болтовых соединений, уплотнений, быстрому износу деталей двигателя. Разрушения, как правило, начинаются с микроскопической трещины в местах концентрации напряжений, а также в местах, где, вследствие больших местных напряжений материал теряет прочность. Затем эта трещина постепенно углубляется и проходит через сечение коленчатого вала, в котором действуют наибольшие напряжения. В процессе происходит трение одной стенки трещины относительно другой. При этом происходит существенные деформации вала, что вызвано возрастанием напряжений в неразрушенной части вала, после ослабления остальная часть вала ломается практически сразу [1].

Амплитуды колебаний деформации различных участков валопровода могут превысить предельно допустимые и привести к поломке самого валопровода, механизмов, оборудования и возникновению аварийной ситуации (рисунок 1).

Масштаб возникшей аварийной ситуации может иметь глобальные техносферные последствия, которые нанесут значительный ущерб компонентам окружающей среды.

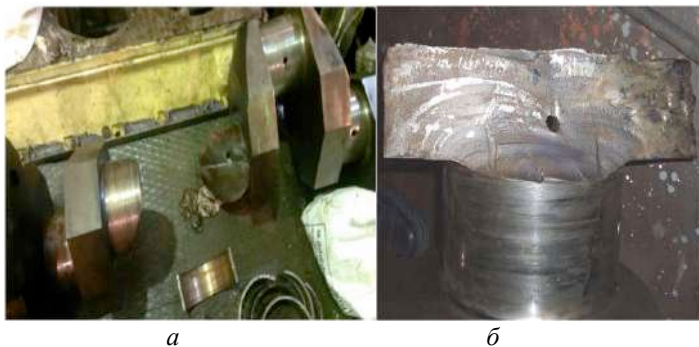


Рис.1 – Разрушение коленчатого вала

*а - разрушение рамовой шейки (фото А.Ю. Корнейчук)[2];  
б - излом левого нижнего коленчатого вала (фото В.В.Маницын,  
А.Н. Соболенко)[3]*

Самые разрушительные последствия аварий на водном транспорте связаны с попаданием жидких грузов, а также нефтепродуктов в воды открытых водных объектов. В результате таких аварий образуется

пленка на водной поверхности, вызывающая массовое уничтожение птиц, рыб, зоопланктона и зообентоса, водных растений. Всей экосистеме водного объекта наносится непоправимый ущерб, включая рыбный промысел.

Для защиты коленчатых валов от недопустимых крутильных колебаний современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) оснащаются специальными устройствами – демпферами. Судовые демпферы представляют собой устройства, предназначенные для уменьшения уровня колебаний коленчатого вала ДВС и валопровода от возмущающих моментов на резонансных режимах работы.

Для достижения наибольшей эффективности демпферы устанавливают на месте развития максимальных амплитуд крутильных колебаний: на носовом конце коленчатого вала, как внутри, так и вне картера дизеля.

Демпферы работают по принципу увеличения неупругих потерь в крутильной системе. Гасители этого типа уменьшают амплитуды колебаний при любой частоте вращения двигателя, включая и резонансную частоту.

В зависимости от способа образования демпфирующих свойств в соединительном звене валопровода с демпфером различают следующие основные виды демпферов: линейные (пружинные), внутреннего трения (резиновые), нелинейные (силиконовые), постоянного трения (фрикционного типа).

При возникновении крутильных колебаний ступица демпфера вместе с коленчатым валом совершает колебательные движения, а маховик с большим моментом инерции стремится сохранить установившееся вращательное движение. Трение в элементах связи, возникающее при относительном перемещении инерционной массы и ступицы (корпуса) демпфирует колебания валопровода.

Одним из наиболее распространенных демпферов на речном флоте являются силиконовые демпферы.

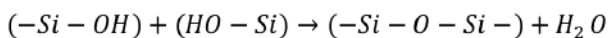
Гашение крутильных колебаний обеспечивается вязким трением в слоях силиконовой жидкости, заполнившей зазор, менее 1 мм, между корпусом и маховой массой. Корпус жестко соединен с коленчатым валом. При установившемся вращении коленчатого вала корпус демпфера и маховая масса вращаются с одинаковой окружной скоростью. Однако, в случае изменения числа оборотов корпус совершает колебательное движение коленчатого вала, в то время как маховая масса стремится вращаться в установленном режиме.

Толкающие усилия, создаваемые относительным движением между обоими элементами, пропорциональны относительным скоростям и

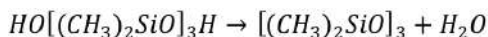
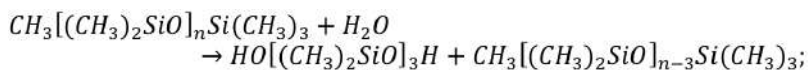
действуют навстречу им, гася, таким образом, колебания. Энергия колебаний превращается в тепловую энергию. Таким образом, демпфер работает в режиме переменной температуры. Температура поверхности демпфера внутри картера может достигать величины 100<sup>0</sup>С и более, а температура поверхности выносного демпфера может превышать температуру окружающей среды на 15<sup>0</sup>С. Кроме того, при начале работы дизеля в демпфере при переменной температуре возникает скорость нагрева, которая находится в пределах от 0 до 9<sup>0</sup>С/мин.

В температурном интервале 30...300 <sup>0</sup>С происходит термическая деструкция силиконовой жидкости (полиметилсилоксана ПМС), сопровождающаяся образованием циклометилсилоксанов (30...100 <sup>0</sup>С), а также выделением летучих компонентов: метана, формальдегида, муравьиной кислоты, углекислого газа и воды.

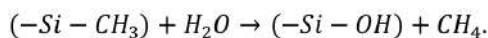
Процессы термической деструкции ПМС инициируются концевыми силанольными группами (-Si-OH), наличие которых обусловлено неполной их конденсацией при производстве силиконовой жидкости. Содержание силиконовых групп в ПМС составляет около 2%. При нагревании силиконовой жидкости силанольные группы вступают в реакцию поликонденсации с образованием воды (H<sub>2</sub>O):



Образовавшаяся вода вызывает первичный гидролиз ПМС связи (-Si-O), что приводит к разрыву основной цепи ПМС и образованию циклодиметилсилоксанов (преимущественно тримеров и тетрамеров):



При более высоких температурах (до 200<sup>0</sup>С) происходит вторичный гидролиз ПМС по связи (-Si-C), сопровождающейся выделением летучих компонентов: метана CH<sub>4</sub> (в инертной среде или вакууме) и формальдегида HCOH (в окислительной среде) или вторичных продуктов его окисления (муравьиной кислоты HCOOH, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O):



Первичный и вторичный гидролиз ПМС приводит к уменьшению количества углерода в молекулах, что вызывает повышение вязкости полимера, и он становится хрупким и стекловидным [4].

Кроме того, необходимо отметить, что качественный состав продуктов разложения ПМС зависит не только от температуры, но и от скорости нагрева силиконовой жидкости. Так при невысокой скорости нагрева (не более 6 °С/мин) преобладают процессы структурирования и образования циклосилоксанов, а повышение скорости нагрева до 9 °С/мин способствует выделению летучих продуктов разложения ПМС.

Из представленного материала можно сделать вывод, что снижение вязкости, вызванное термическим разложением силиконовой жидкости, уменьшает трение практически до нуля в элементах связи между корпусом демпфера и инерционной массой. Силиконовой демпфер становится практически неработоспособным снижая и прекращая свое назначения по гашению крутильных колебаний валовых линий СЭУ.

Снижение гашения крутильных колебаний валовых линий СЭУ при помощи силиконового демпфера приведет, как следствие, к неизбежной поломке самого валопровода, коленчатого вала ДВС, механизмов, оборудования и увеличивается возможность возникновения аварийной ситуации техногенного характера на водном транспорте.

Диагностику демпфера целесообразно начинать после истечения 30 % срока эксплуатации.

Во избежание возникновения аварий Российским морским регистром судоходства после 24...30 тысяч часов работы силиконового демпфера требуется проверка его технического состояния, в случае неисправности не допускается эксплуатировать такой демпфер.

#### Литература

1. Кораблин А.В., Шевченко А.В., Протасов М.В. Стенд для натурных испытаний силиконовых В-790 судовых дизелей // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2009. - №2. – С.174-177.
2. Корнейчук А.Ю. Исследование предельного состояния коленчатого вала судового среднеоборотного дизеля // Вестник АГТУ Сер.: Морская техника и технология. – 2017. - №3. – С.53-60.
3. Маницын В.В., Соболенко А.Н. Уравнения регрессий основных характеристик коленчатого вала судового дизеля // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2016. – том 34. – С.81-86.
4. Глушков С.П., Глушков С.С., Ярославцева А.С. Исследование процессов термического разложения силиконовой жидкости в судовых демпферах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2006. - №2. – С.111-112.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЛИТЬЕВОГО ПОЛИУРЕТАНА

**Е.П. Вентлянд<sup>1,2</sup>, Ф.К. Горбунов<sup>1,2</sup>, А.А. Фаина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского  
отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН),  
г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
(НГТУ), г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20,  
[katerina.ventlyand@mail.ru](mailto:katerina.ventlyand@mail.ru)

*Физико-механическими методами исследованы свойства литьевых полиуретанов (ЛПУ), синтезированных на основе уретанового преполимера SKU ПФЛ-74 и отвердителя МОСА. Приведены результаты экспериментов по изменению предела прочности и удлинения при растяжении в результате термообработки композитов на основе литьевого полиуретана.*

*The properties of castable polyurethanes (CPU) have been investigated by physical and mechanical methods. CPU synthesized on the basis of urethane prepolymer SRU PFC-74 and urethane prepolymer hardener MOCA by physical and mechanical methods have been investigated. The results of experiments on changes in tensile strength and elongation as a result of heat treatment of composites based on injection-molded polyurethane are presented.*

Полиуретановые эластомеры являются универсальными материалами. Они имеют повышенные физико-механические свойства (стойкость к истиранию, прочность и эластичность) и применяются в различных областях промышленности: в авиастроении, медицине, текстильной, тяжелой промышленности и др.. Наиболее широкое применение получили литьевые полиуретановые эластомеры горячего отверждения. Полимеры используются для изготовления материалов, работающих в различных условиях, в том числе при высоких механических нагрузках. Однако использование полимерных материалов в агрессивных условиях (воздействие высоких и низких температур) приводит к снижению их прочностных характеристик. В связи с этим, улучшение эксплуатационных характеристик полиуретанов является актуальным.

Востребованность и универсальные свойства полиуретановых эластомеров приводит к необходимости утилизации большого количества изделий из них, что наносит вред окружающей среде. При сжигании полиуретанов образуются высокотоксичные цианистые соединения и оксиды углерода, загрязняющие атмосферу. Решение проблемы ликвидации полиуретановых отходов без ущерба

окружающей среды – это сейчас самая острая проблема современного мира. Одним из методов сокращения полимерных отходов является модифицирование полиуретанов для улучшения их свойств и тем самым увеличения срока эксплуатации.

Целью работы являлось исследование влияние модифицирования на изменение характеристик ЛПУ в результате воздействия внешних факторов.

В работе получены образцы литьевого полиуретана на основе преполимера СКУ ПФЛ-74 (синтетический каучук уретановый полифуритный литьевой с содержанием 74 % изоцианатных (NCO групп) и отвердителя МОСА (4,4' — метилен-бис (ортохлоранилин)).

Методика и технологическая схема синтеза композиционных материалов на основе полиуретанов представлена в работе [1].

Модифицирование литьевого полиуретана проводили *in situ*, когда исходные компоненты находились в жидком состоянии. Порошки-модификаторы на основе нанодисперсных частиц диоксида кремния Tarkosil® (Т-100) вводили в преполимер на стадии смешения исходных компонентов синтеза, так как в его структуре содержится реакционно-способная NCO группа, по которой идет основная реакция синтеза полимера. Содержание модификатора составило 0,005 масс. %.

Термообработку образцов проводили в сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 20, 40, 60, 80 и 100 ч.

Исследование изменения свойств полимеров в результате циклического замораживания (10, 50 и 100 циклов) проводили при температуре минус 196 °С в среде жидкого азота с последующей водной дефростацией (вода комнатной температуры).

Предел прочности при разрыве образцов определяли по ГОСТ 269-66 [2], твёрдость – по ГОСТ 263-75 [3]. Изменения, происходящие в структуре полимера при его модификации наночастицами, исследовали с помощью оптического микроскопа.

Физико-механические характеристики образцов литьевого полиуретана на основе преполимеров СКУ ПФЛ-74 разных партий представлены в таблице 1. Партия преполимера №1 изготовлена на 12 месяцев ранее партии №2.

Из данных таблицы 1 видно, что характеристики образцов ЛПУ на основе партии №1 ниже, чем на основе партии №2: твердость на 2 %, прочность при растяжении на 13 %. Введение модификатора в количестве 0,005 масс. % приводит к незначительным изменениям характеристик материала.

Характеристики ЛПУ в результате термодеструкции при 150 °С приведены на рисунке 1.

**Таблица 1 – Физико-механические характеристики образцов ЛПУ**

№ п. п	Партия преполимера	Содержание модификатора марки Т-100, масс. %	Твёрдость, Шор А	Предел прочности при растяжении, МПа (Н/мм <sup>2</sup> )
1	№1	–	92.6	23.2
2	№2	–	94.1	26.7
3	№2	0,005	94.5	27.6

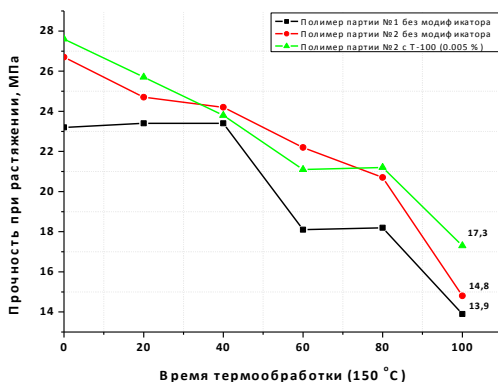


Рис. 1 – График зависимости предела прочности от времени воздействия температуры (150 °C)

Из данных рисунка 1 видно, что термодеструкция при 150 °C в течение 100 ч приводит к снижению прочностных характеристик образцов ЛПУ. При этом прочность при растяжении ЛПУ модифицированного нанодисперсным оксидом кремния составляет 17.3 МПа, что на 20 % выше полиуретана на основе партии №1 и на 15 % партии №2.

Характеристики ЛПУ в результате циклического замораживания при минус 196 °C приведены на рисунке 2. Видно, что образцы №2 партии ведут себя аналогично, в отличие от полимера №1 партии. Вероятно, это связано с изготовлением полимеров в разный период времени, а также с физико-химическими изменениями структуры полимера.

Термообработка полимерных образцов в жидком азоте в течение 50 циклов показала, что прочность при растяжении полиуретанов партии №1 составляет 28.9 МПа. А у полимеров партии №2 без добавления модификации и модифицированных Т-100 значения прочности ниже на 13 и 18 % соответственно.

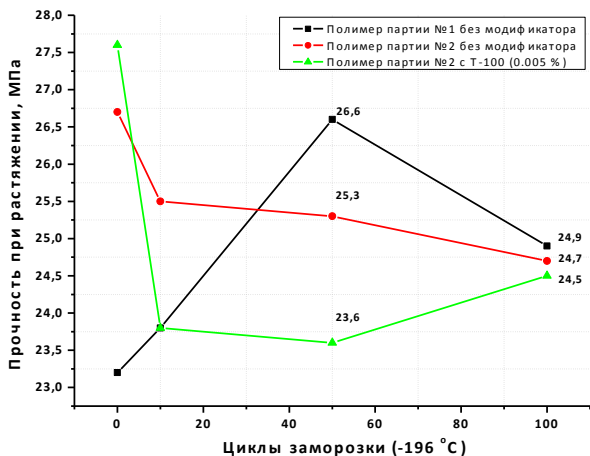


Рис. 2 – График зависимости предела прочности от циклов заморозки

Отметим, что в результате 100 циклов обработки при температуре жидкого азота, не происходит существенных изменений эксплуатационных характеристик немодифицированного и модифицированного полиуретанов партий №1 и 2.

Таким образом, было изучено влияние высоко- и низкотемпературной обработки на физико-механические свойства образцов композитов на основе литьевого полиуретана.

Проведенное исследование показало, что:

- добавление в полиуретан горячего отверждения в количестве 0.005 % нанодисперсного оксида кремния приводит к улучшению его физико-механических показателей (твёрдость, предел прочности при растяжении, термостойкость);
- модифицирование ЛПУ негативно влияет на морозостойкость, что вероятно связано с физико-химическим составом полиуретанов;
- полимерные материалы являются более стойкими к отрицательным температурам, чем к положительным.

#### Литература

1. Полубояров, В. А. Модификация нанодисперсиями каучукообразных полимеров : монография / В. А. Полубояров, Ф. К. Горбунов, Е. В. Волоскова // LAP Lambert Academic Publishing. – 1993. – 131 с.

2. ГОСТ 269-66. Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний = Rubber. General requirements for physical mechanical testing. Tensile strength and elongation tests– Введ. 1966-02-08. – М.: Стандартинформ, 2007. – 11 с.

3. ГОСТ 263-75 (СТ СЭВ 1198-78). Резина. Метод определения твердости по Шору А = Rubber. Method for determination of Shore A hardness. – Введ. 1975-01-21. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 7 с.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ НА ПРИМЕРЕ «НИНХ»**

**Д.А. Власова, М.В. Пинаева,**  
**Новосибирский государственный университет экономики и**  
**управления «НИНХ», vlasova.da2001@gmail.com**  
**Научный руководитель: Катункина Е.В., ст.пр.**

*В данной статье затронута очень важная проблема образования отходов на территории Новосибирского Государственного Университета Экономики и Управления; описаны основные виды и объёмы существующих отходов, описаны меры, которые были предприняты для улучшения ситуации и их значимость для ВУЗа; рассмотрены документы, влияющие на необходимость РСО и даны рекомендации по эксплуатации раздельного сбора отходов.*

*This article touches upon a very important problem of waste generation on the territory of Novosibirsk State University of Economics and Management; describes the main types and volumes of existing waste, describes the measures that have been taken to improve the situation and their significance for the university; documents affecting the need for RSO are considered and recommendations for the operation of separate waste collection are given.*

В последний день 2017 года, объявленного в России Годом экологии, Президент В.В. Путин подписал закон о раздельном сборе отходов. В законе прописано и само понятие "сбора отходов", под которым подразумевается прием отходов в целях их дальнейшей обработки.

За минувшие годы существенных сдвигов в обеспечении разделения отходов не произошло. На примере образовательной организации ФГБОУ ВО Новосибирский государственный университет экономики и управления попытаемся выявить проблемы, узкие места и, возможно, определить стратегические направления оптимизации обращения с ТКО.

В ходе всестороннего рассмотрения проблемы РСО, командой Эколого-экономического клуба был разработан проект по раздельному

сбору отходов в стенах НГУЭУ. Впоследствии проект команды БизнесТут «Нархоз Сортирует» победил в номинации как «Самый инвестиционно привлекательный проект» в финале конкурсных мероприятий Всероссийского акселератора социальных инициатив сезона 2020/2021 RAISE.

Известно, что по инициативе вышеупомянутых студентов 15.03.2021 года была подписана петиция о РСО в вузе, которую подписали более 300 человек. Из 700 опрошенных студентов и сотрудников вуза 89,9% выразили согласие на отдельный сбор коммунальных отходов.

На самом деле планирование внедрения отдельного сбора в конкретном регионе следует начинать «от конца к началу технологической цепи». Просчитать экономический эффект от установки контейнеров по отдельному сбору отходов возможно только после длительного функционирования системы РСО и проведения дополнительных замеров и исследований по отходам.

Однако, несмотря на существующие препятствия, администрация вуза убедилась, что внедрение отдельного сбора отходов благоприятно повлияет на имидж вуза, поэтому идёт навстречу экологической инициативе. Кроме вступления в Ассоциацию «Зелёных вузов» это ещё и гарантирует повышение позиций в рейтинге лучших университетов Новосибирска, а также это шанс попасть в международные рейтинги GreenMetric по категории программы переработки производимого университетом мусора.

Прежде всего необходимо определиться с наличием доступных рынков сбыта каждого вида вторичных ресурсов, а также, исходя из этого, конкретных вторичных ресурсов, которые будут выделяться из потока.

Из Приказа Минприроды России от 08.12.2020 № 1029 "Об утверждении порядка разработки и утверждения нормативов образования отходов и лимитов на их размещение" исходит следующее: «В лимиты на размещение отходов не включаются: масса (объем) отходов, накопление которых осуществляется в целях их дальнейшей реализации и (или) обработки, утилизации, обезвреживания» [1]. Данное положение на примере университета позволяет не только не платить за размещение отходов, но и зарабатывать на их продаже.

Из всех отходов, образующихся в стенах университета, бумажные отходы составляют около 12-15%, в связи с переходом на систему электронного документооборота. С учетом ежегодно проводимых в НГУЭУ акций по сбору макулатуры «Сдай бумагу – сделай благо!», количество незагрязненной бумаги может составить около 10 000 кг. На момент исследования в Новосибирске 1 килограмм макулатуры

принимается заинтересованными организациями по 6 рублей. Если же объем вторичного сырья составлял менее 400 кг, а для его вывоза использовались автомобили организации, то стоимость кг макулатуры не превышала 2 руб./кг [2]. Как следствие, за сдачу бумаги на вторичную переработку можно получить дополнительные средства в размере 60 000 руб.

Анализ мусорной корзины аудиторией в вузе показал, что около 50% ее содержимого составляют пластиковые отходы, причем подавляющее количество (35%) – ПЭТ-бутылки из-под воды, объемом 0,5 л. Остальная часть отходов пластика загрязнена пищевыми продуктами.

Таким образом, около 265 м<sup>3</sup> отходов НГУЭУ составляет пластик. Пластиковые отходы в городе Новосибирск можно сдавать по 8 рублей за 1 кг, а если сортировать пластик по цвету, то его закупочная стоимость увеличится. Возрастает экономия вуза.

На промежутке времени 2020-2021 при учёте тарифа на вывоз ТКО в размере 301,92 руб., указанного на официальном сайте региональным оператором ООО «Экология-Новосибирск», и объёме отходов в вузе 2530,41 м<sup>3</sup>общая стоимость составит 764064,41 руб.

Исходя из собранных материалов установлено, что объем отходов пищевого производства составляет 5-6 м<sup>3</sup> в год. Эти отходы используются для собственных нужд работниками столовой. Они не поступают в мусорные контейнеры и соответственно, не вывозятся на полигон. Легализация отходов позволит снизить общий объем вывозимого ТКО.

Для улучшения ситуации с раздельным сбором отходов в НГУЭУ можно разрабатывать несколько стратегических направлений развития по оптимизации обращения с ТКО:

- 1) сдавать вторсырьё самостоятельно в целях мониторинга накопления и своевременного вывоза ТКО;
- 2) ограничить доступ к контейнерам третьих лиц;
- 3) оборудовать площадки и подготовить места под раздельный сбор отходов, в соответствии с требованиями Федерального закона от 30.03.1999 №52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».
- 4) провести дополнительные исследования в части мониторинга образования, накопления и обращения отходов в вузе;
- 5) организовать информационную поддержку инициативы Эколого-экономического клуба, для формирования и экологической ответственности и культуры обращения с отходами в вузе;
- 6) производить учёт пищевых отходов столовой в связи с их «утилизацией для личных целей»;

7) разработать дорожную карту перевода вуза на РСО [3].

При условии, что из всей массы отходов университета будет отнята та часть, которая пойдет на вторичное использование (макулатура и пластиковые изделия), для общей утилизации останется примерно чуть меньше половины от общего количества несортируемых отходов, что приведет к уменьшению выплаты за вывоз отходов с территории вуза и к привлечению дополнительных денежных средств.

Литература:

1. Федеральный закон от 31 декабря 2017 г. № 503-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" [Электронный ресурс] URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_286766/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286766/).

2. Твёрдые бытовые отходы. Экономика. Экология. Предпринимательство: монография / В.И. Коробко, В.А. Бычкова с. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. – 131 с. – 27 с.

3. Катункина Е.В. ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. 2017 Издательство: ООО «Научное партнёрство «Апекс» (Иркутск) [Электронный ресурс] URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32365476>.

## **АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ СПОСОБА ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ВОД, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕМ И ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЕМ**

**В.В. Гуровский, Л.А. Яковлева, С.М. Джумушева**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, [gurovskij@corp.nstu.ru](mailto:gurovskij@corp.nstu.ru)**  
**Научный руководитель: Александров В.Ю. к.х.н., доцент**

*Представлены доводы актуальности разработки метода очистки вод, загрязненных этилен- и пропилен-гликолями, которые образуются при эксплуатации воздушных судов. Приведены аргументы в пользу метода озонирования.*

*Arguments for the relevance of the development of a method for purifying waters contaminated with ethylene and propylene glycols, which are formed during the operation of aircraft, are presented. Arguments in favor of the ozonation method are presented.*



Этиленгликоль и пропиленгликоль находят широкое применение в различных технических и производственных процессах. В работе авторы выделяют его применение в авиации в качестве противообледенительной жидкости (ПОЖ). Основными средствами, используемыми в мировой практике для защиты воздушных судов от наземного обледенения, являются противообледенительные жидкости (ПОЖ), содержащие этиленгликоль и пропиленгликоль, которые обеспечивают как удаление льда, снега, изморози, инея, так и предотвращение их образования на поверхности воздушных судов в течение некоторого времени. Среди основных требований к ПОЖ оказывать минимальное отрицательное влияние на окружающую среду. Только 20-25% жидкости непосредственно участвует в противообледенительном процессе, а, большая часть жидкости, стекает на землю во время обработки самолета либо сдувается с его поверхности ветром. Оставшаяся же на поверхности самолета жидкость сбрасывается при взлете и разносится вдоль взлетно-посадочной полосы [5].

Правовые и нормативные аспекты экологического риска гликолей представлены ниже:

*Этиленгликоль* ( $C_2H_6O_2$ , этандиол – 1,2) относится к загрязняющим веществам (ЗВ) водных объектов, в отношении которого применяются меры государственного регулирования [1]. Ставка платежей за загрязнение водных объектов на 2018 г., установлена в сумме 2976, 5 руб./т [2].

*Пропиленгликоль* ( $C_3H_8O_2$ , пропандиол – 1,2) относится к загрязняющим веществам (ЗВ) водных объектов, в отношении которого не установлены меры государственного регулирования [1]. Поэтому, ставка платежей за загрязнение водных объектов не установлена [2].

Опасность пропиленгликоля для водных объектов различных категорий водопользования характеризуют величины ПДК:

- водоемы хозяйственно-питьевого назначения – не установлена [3];
- водоемы рыбо-хозяйственного назначения – 0,5 мг/л [4].

Учитывая, представленные выше, экологически опасные показатели гликолей, правила эксплуатации аэродромов требуют сбор и обезвреживание отходов ПОЖ, которые, согласно ФККО-2017 [6] относятся к 3-му классу опасности: код отхода 92321111313 «Отходы противообледенительной жидкости на основе этиленгликоля». Химический состав отходов, согласно [7]: этиленгликоль – 88%; Вода – 10%; Следовые загрязнения (сера, галогены, фосфор, нитраты, тяжелые металлы) – 2%.

Для отходов 3-го классов опасности экологическое законодательство устанавливает обязанность их обезвреживания лицензированными организациями [8], либо захоронения на полигонах промышленных отходов, что исключает возможность их сброса в водоемы, или рельеф местности.

Экологическую опасность гликолей можно установить методами биоиндикации. Особи, приведённые в таблицах 1 и 2, являются самыми чувствительными биоиндикаторами изменения окружающей среды и рассматриваются в качестве модельных для всех водных организмов согласно ГОСТа 32424-2013 и руководства Р 1.2.3156-13.

**Таблица 1 - ПОЖ типа I «Octaflo EG»**

Экологические и токсикологические характеристики	Физико-химические свойства
1. Состав жидкости «ОCTAFLO EG» этиленгликоль(ГОСТ 19719-)-88%вода очищенная -10% комплексная присадка2% (производство «OCTAGON PROCESS INC.»)	1. Внешний вид жидкость красно-оранжевого цвета от прозрачного до мутного
2. Химическая характеристика жидкости этан – 1,2-диол с ингибиторами коррозии	2. Показатель преломления при 20°С в пределах нормы 1,4206-1,4236
3. Экотоксическое действие жидкости: Токсичность на дафниях(острая): EC <sub>50</sub> (48 часов) >0.100мг/л(Daphnia Magna)-I кл. Токсичность на рыбках: LC <sub>50</sub> (96 часов) >0.100 мг/л (Pinephales Promelas)-I кл..	3. Водородный показатель (pH) при 20°С нормы: 7,8 - 8,6
4. Токсикологические свойства: LD50 /орально/ крыса: более 2000 мк/кг –III кл. Первично раздражающие действие на кожу/ кролик/: не вызывает раздражение. Первично раздражающие свойства на слизистую/кролик/: не вызывает раздражение.	4. Плотность при 20°С, не менее 1,104 г/см <sup>3</sup>
5. Степень распада жидкости: более 35% в течении 5 дней при температуре 20°С, остальная часть в течении 28 дней	5. Температура замерзания объемной смеси 50:50, не меньше -33°С(факультативно)
6. Потребность кислорода при разложении – 1,26 кг кислорода на 1 кг жидкости.	6. Поверхность натяжение при 20°С, 40 мН/м, (факультативно)
7. Растворимость: в воде – неограниченная; в других растворителях – растворим в полярных растворителях.	
8. Класс опасности – 4 класс по ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»	

Для простейших и рыб жидкость «Octaflo EG» имеет II класс опасности. Данные выводы можно сделать, изучив экотоксикологические и токсикологические свойства [10].

ПОЖ «Maxflight 04» (тип IV) – против- и антиобледенительная жидкость. Состав основан на пропиленгликоле. Данный тип применяется только при двухступенчатой обработке воздушных судов и значительном обледенении фюзеляжа и кромок крыла. «Maxflight 04» имеет высочайший резерв безопасности из всех имеющихся в наличии жидкостей SAE типа IV. Она является более сильным токсикантом для окружающей среды. Из данных таблицы 2, можно сделать вывод: жидкость данного типа относится ко II классу опасности, так как, например, для уничтожения половины особей *Oncorhynchus Mykiss* (радужная форель) требуется мизерная доза – всего 1,732 мг/л. Сомнения вызывает выборочное действие жидкости на организмы, так как для одних оно значительно, для других – не определено [10].

**Таблица 2 - ПОЖ типа IV «Maxflight 04»**

Экологическая и токсикологические характеристики	Физико-химические свойства
1. Потребность кислорода, биологическая 0,49 мг/л. При t=20°C	1. изумрудно-зеленая жидкость
2. Потребность кислорода 0,78 мг/л. При t=20°C	2. Коэффициент преломления при 20°C = 1,39-1,393
3. БПК/ХПК = 0,65	3. Водородный показатель (рН) при 20°C нормы: 6,5 – 7,5
4. Токсикологические свойства и класс опасности согласно ГОСТов: А) LC <sub>50</sub> (48 часов) 814 мг/л <i>Arcatia Tonsa Dana</i> – нет Б) EC <sub>50</sub> (24 часов) >999 мг/л <i>Daphnia Magna</i> – нет В) LC <sub>50</sub> (48 часов) 975 мг/л <i>Daphnia Magna</i> – нет Г) LC <sub>50</sub> (10 дней) 5.161 мг/кг <i>Dry sediment</i> – II кл. Д) LC <sub>50</sub> (48 часов) 1.732 мг/л <i>Oncorhynchus Mykiss</i> – II кл. Е) LC <sub>50</sub> (48 часов) 1.975 мг/л <i>Pimephales Promelas</i> – II кл. Ё) EC <sub>50</sub> (48 часов) 4.197 мг/л <i>Selenastrum Capricornutum</i> – III кл. Ж) LC <sub>50</sub> (48 часов) 515 мг/л <i>Skeletonema Costatum</i> – нет	4. Плотность при 20°C, г/см <sup>3</sup> , ~1,038 кг/дм <sup>3</sup>
5. Биологическое разложение Более 96% в течении 4 дней Более 97% в течении 3 дней	5. Динамическая вязкость при 20°C 10.000-14.500 мПа*с

### **Масштабы загрязнения**

В сутки, в зависимости от метеоусловий, в крупном узловом аэропорту северных широт производится обработка минимум 20% от всех вылетающих ВС. Стоит отметить тот факт, что распределение отработанных жидкостей на территории аэродрома происходит неравномерно, точно. Рассчитаем площадь загрязнённого участка при обслуживании одного ВС, который можно покрыть образующейся плёнкой от ПОЖ толщиной –  $H$  в 1 мм, при условии постоянной плотности. Именно такой высоты столба жидкости хватает, чтобы практически полностью остановить газообмен между верхним горизонтом почвогрунта и приповерхностным слоем воздуха.

Таким образом, потенциально загрязняемая территория в минимальном случае в разы превышает площадь стоянок аэродрома, а если учесть интенсивность обработки при пиковых нагрузках в аэропортах, то суммарное загрязнение становится крупномасштабным.

С учетом химических свойств гликолей и экологических требований к обезвреживанию загрязненных ими вод, можно остановить выбор способа обезвреживания на глубоком окислении гликолей методом озонирования. При этом, в отличии от реагентных окислителей, глубокое окисление этиленгликоля приведет к образованию только экологически безопасных продуктов  $CO_2$  и  $H_2O$ .

Рассмотрение возможных окислительных превращений в растворе показывает, что вероятными продуктами парциального окисления могут быть: муравьиная кислота и муравьиный альдегид, а также, уксусный альдегид.

Чувствительным методом определения органических веществ, в том числе названных продуктов парциального окисления в воде, является метод перманганатной окисляемости, который позволяет количественно определить не только глубину очистки воды от ЗВ, но и определить эффективность вовлечения озона в процесс очистки [9]. Другим показателем глубины очистки является значение водородного показателя раствора. Совершенно очевидно, что полностью очищенная от этиленгликоля и продуктов парциального окисления вода должна иметь  $pH=7$ .

Заключение статьи, в интересах защиты вод и земель от загрязнения этиленгликолем, применяемом в противо-обледенительной жидкости, при эксплуатации воздушных судов, представляется актуальным исследование по очистке вод методом озонирования.

Литература:

1. Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды: распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 № 1316-р, от 8 июля 2015 г. N 1316-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2015. – №29. – Ст. 4524.

2. О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах: постановление правительства Российской Федерации от 13 сентября 2016 г. № 913 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2014. – № 2. – Ст.100.

3. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – Введ.15.06.2003. – М.: Минздрав России, 2003.

4. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 г. № 552 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 27. – Ст.3286. – 2012. – № 44. – Ст.6026.

5. Патент 2221833 С1. Противообледенительная жидкость для наземной обработки самолетов / В.А.Орлов. – №2002118864/04; заявл. 18.06.2002; опубл. 20.01.2004, Бюл. № 5. – 7 с.

6. Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов: приказ Минприроды от 22.05.2017 г. №242 // Собрание законодательства Российской Федерации от 2004. – №32. – Ст.3347 [Текст].

7. Инструкция по применению противообледенительной жидкости типа 1 на основе этиленгликоля «Safewing EG 1 1996 (88) / М.: 2009.

8. Федеральный закон «О лицензировании отдельных видов деятельности» от 04.05.2011 г. № 99-ФЗ. – Принят Гос. Думой РФ 22.04.2011 [Электронный ресурс] / Техэксперт. - Дата обращения: 30.09.2020 г.

9. Александров В. Ю., Гуровский В.В. Оценка эффективности очистки вод, загрязненных анилином методом озонирования // Наука, Промышленность, Оборона: материалы всерос. науч. конф.: в 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – С. 138.

10. Каталог противообледенительных жидкостей ООО «ХиАтон» [Электронный ресурс] URL: <http://www.hiaton.ru/catalog/13342/> (дата обращения 05.11.2021).

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СТАНКОВ И НАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ МАШИНЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА

С.В. Казакевич, Н.А. Маслов

Сибирский государственный университет путей сообщения,

г. Новосибирск, [pamaslov@mail.ru](mailto:pamaslov@mail.ru)

Научный руководитель: Маслов Н.А., к.т.н., доцент

*В работе выполнен информационный патентный поиск опорных станков и нагрузочных устройств колесного движителя универсального стенда, предложена классификация, выполнен сравнительный анализ станков и нагрузочных устройств по сформулированным критериям, выбраны типы станка и нагрузочного устройства колесного движителя.*

*In the work, an information patent search for supporting machines and loading devices of the wheel propulsor of the universal stand is performed, a classification is proposed, a comparative analysis of machines and loading devices according to the formulated criteria is performed, and types of machines and loading devices of the wheel propulsor are selected.*

Тяговые расчеты - важные виды расчетов при создании и модернизации подъемно-транспортных, путевых, строительных, дорожных и других самоходных машин. Они позволяют выбрать величины параметров машин для обеспечения требований технического задания. Для грамотного выполнения тяговых расчетов машин необходимо качественное освоение их методик. Это возможно в процессе интерактивного обучения на оригинальных учебных стендах и тренажерах в ВУЗе.

Целью работы является разработка опорного станка колесного движителя машины универсального стенда.

Задачи работы: информационный патентный поиск опорных станков и нагрузочных устройств колесного движителя машины стенда; разработка классификаций станков и нагрузочных устройств; сравнительный анализ станков и нагрузочных устройств по сформулированным критериям; выбор типов станка и нагрузочного устройства колесного движителя машины стенда.

Идея работы заключается в создании универсального стенда (Рисунок 1), выполняющего функции учебного стенда, спортивного тренажера (для имитации гребли на байдарке) или средства индивидуального передвижения (машины) на колесном, гусеничном и рельсовом ходу, а также в стационарном исполнении на станке. Тема работы соответствует концепции воспитательной работы в университетских комплексах Федерального агентства

железнодорожного транспорта и программе развития факультета Управление транспортно-технологическими комплексами. Предлагаемая концепция универсального стенда реализует принцип обучения через физическое воспитание, предлагает оригинальный способ индивидуального передвижения с пользой для здоровья и без вреда для экологии. [1-6]



Рис.1 - Идея работы

Представляемая работа является студенческой научно-исследовательской работой, гипотеза исследования которой, сформулирована следующим образом: «Полученные на основе расчетной схемы стенда теоретические результаты моделирования позволяют по ограниченному количеству параметров машины определять необходимые для ее проектирования основные характеристики». Методами исследования, примененными в работе являются: анализ; классификация; патентный поиск и изобретательская работа; а также математическое моделирование.

Недостатками ранее предложенного варианта станка, выполненного в виде трейнера, для колесного движителя машины стенда являются: невозможность изменения сопротивления вращению колес движителя, большая металлоемкость, только задние роликовые опоры колес движителя и, как следствие, недостаточная реалистичность имитации движения машины при ее установке на трейнере. Для устранения выявленных недостатков предложено разработать станок на основе

велосипедного. Для выбора типа станка проведен информационный патентный поиск, найдены аналоги (разработки фирм Elite, Cyclesops и Minoura) и прототип станка (фирма Tасх).

На основании результатов анализа существующих конструкций велостанков предложена классификация станков и нагрузочных устройств к ним (рисунок 2).



Рис. 2 - Предложенная классификация станков и нагрузочных устройств

Велостанки по конструкции классифицируются на роллерный станок и трейнер. Нагружение колесного движителя и его привода на роллерном станке осуществляется от веса человека и велосипеда, а нагружение колесного движителя и его привода на трейнере - отдельным нагрузочным устройством. По способу нагружения нагрузочные устройства трейнеров бывают воздушными, магнитными и жидкостными. Роллерные станки по форме роликов бывают с прямыми и коническими роликами. Роллерные станки по приводу роликов бывают только с приводом задних роликов от колеса велосипеда или с дополнительным приводом и переднего ролика через передачу. Роллерные станки бывают с имитацией продольного «рысканья» велосипеда или без него. По числу роликов станки обычно трехроlikовые. Для нашего случая необходим четырехроlikовый станок, т.к., однако, байдарки «в гору не ходят».



По сформулированным критериям выполнено сравнение роллерного станка и трейнера (Таблица 1). Трейнер оказался самым технологически продвинутым, но и дороже роллерного станка из-за наличия нагрузочного устройства. Роллерный станок обеспечивает большую реалистичность движения машины на станке, т.к. нет поперечной фиксации рамы машины в станке. Разрабатываемый универсальный стенд (предлагаемый вариант) может совмещать свойства роликового станка и трейнера при необходимости лучшей имитации движения и дополнительного нагружения колесного движителя машины на станке.

**Таблица 1 - Результаты сравнительного анализа станков по сформулированным критериям**

Классификационный признак						
Тип станка	Устойчивость	Размеры	Фиксация в станке	Сопротивление	Малошумность	Цена
Роллерный	+	+	-	-	-	□
Трейнер	++	++	++	++	+	½□...>□□□□
Разрабатываемый станок	+	+	+	+	+	□□* (□□□□)**

\*без нагрузочного устройства; \*\*с нагрузочным устройством

Выполнен сравнительный анализ нагрузочных устройств велостанков по сформулированным критериям (Таблица 2). Выявлено, что чем лучше характеристики станка, тем дороже его нагрузочное устройство. Лучшие характеристики станку обеспечивает магнитно-порошковый тормоз.

**Таблица 2 - Результаты сравнительного анализа нагрузочных устройств станков по сформулированным критериям**

Классификационный признак				
Тип нагрузочного устройства	Диапазон сопротивления	Реалистичность езды	Малошумность	Цена
Собственный вес	+	+	+++	□
Воздушное	++	+	+	□
Магнитное	+++	++	++	□□
Жидкостное	++++	+++	+++	□□□
Магнитно-порошковое	+++++	++++	+++	□□□ □

Идея компоновки разрабатываемого станка (Рисунок 1) заключается в следующем. На трехроликовый станок принято установить четвертый

ролик для обеспечения строго горизонтального положения колесной машины. К заднему ролику решено подсоединить нагрузочное устройство в виде регулируемого магнитно-порошкового тормоза с управлением от контроллера. Четвертый и внутренний задний ролик принято соединить передачей (на рис. 1 условно она не показана).

#### Литература

1. *Алимбекова М. Ф., Маслов Н. А.* Разработка алгоритма оптимизации параметров колесной машины для сухопутной гребли // Интеллектуальный потенциал Сибири: 27-я Региональная научная студенческая конференция (г. Новосибирск, 23-25 сентября 2019 г.): материалы конференции: в 3 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. Часть 2: Сборник научных трудов. – 424 с., с.128-130.

2. *Алимбекова М.Ф., Маслов Н. А.* Определение геометрических параметров проектируемой машины для сухопутной гребли методом численного моделирования // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. Часть 2. – 264 с., с.94-97.

3. *Алимбекова М.Ф., Маслов Н.А.* Применение метода численного моделирования при определении параметров универсальной машины для новых технических видов спорта // Цифровые трансформации в образовании (E-Digital Siberia'2020): материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 23 апреля 2020 г.). Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2020. – 246 с., с.5-11.

4. *Алимбекова М.Ф., Маслов Н.А.* Расчет и сравнение параметров сменных двигателей машины для сухопутной гребли // М.Ф. Алимбекова, Н. А. Маслов // Интеллектуальный потенциал Сибири: 28-я Региональная научная студенческая конференция (г. Новосибирск, 13-22 мая 2020 г.): материалы конференции: в 3 частях / Под. ред. Соколовой Д.О. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. Часть 2: Сборник научных трудов. – 606 с., с.326-327.

5. *Алимбекова М.Ф., Маслов Н. А.* Имитационное моделирование механического привода универсальной машины для новых технических видов спорта // "Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях": материалы международной научно-практической конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. - 441 с., с.16-21.

## ПОЛУЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОТХОДОВ ДРОБЛЕНИЯ ГРАНИТНОГО ЩЕБНЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК

А.В. Лапин<sup>1,2</sup>, Л.К. Бердникова<sup>2</sup>, Ф.К. Горбунов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет  
(НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20  
Lapinan96@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского  
отделения Российской академии наук  
(ИХТТМ СО РАН), 630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

*Приведены результаты исследований по разработке методики получения строительных материалов на основе отходов дробления гранитного щебня и силикатного связующего с добавлением в сырьевую смесь стеклобоя и корунда.*

*Установлено, что, получаемые изделия обладают более высокими физико-механическими свойствами, чем изделия, полученные по той же методике в работе [1]. Наиболее оптимальной температурой обработки, при которой изделия становятся водостойкими и обладают нейтральным (слабощелочным) рН поровой жидкости, является 500-600 °С.*

*The results of research on the development of methods for obtaining building materials based on granite crushed stone and silicate binder crushing waste with the addition of cullet and corundum to the raw material mixture are presented.*

*It is established that the resulting products have higher physical and mechanical properties than the products obtained by the same method in the work [1]. The most optimal processing temperature at which the products become water-resistant and have a neutral (slightly alkaline) pH of the pore liquid is 500-600 °C.*

В качестве наполнителя для получения образцов использовали полифракцию (0,14...7 мм) отхода дробления гранитного щебня (отсев) из карьера Борок г. Новосибирска. В качестве модифицирующих добавок применяли стеклобой (10% от общей массы исходной смеси) и корунд (10...15% от общей массы исходной смеси), размер зерен (d) которых составлял < 0,14 мм.

В качестве сырья для получения связующего компонента использовали раствор гидроксида натрия и диатомит Инзенского месторождения, предварительно обожженный при температуре 900 С. Методика получения связующего была описана в работе [2].

Методика получения строительных изделий представлена в работе [3].

Изделия, полученные в работе [1], обладают водостойкостью при термообработке 500-700 С. Нейтральным рН поровой жидкости изделия обладали при термообработке 700 С. Однако, образцы не

имели высоких физико-механических показателей (прочность при сжатии < 20 МПа). В связи с этим, для увеличения прочности изделий в дальнейших исследованиях, помимо стеклобоя, добавляли корунд в количестве 10...15% от общей массы исходной смеси.

Результаты полученных физико-механических показателей вследствие добавления корунда в количестве 10% от общей массы исходной смеси представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Физико-механические характеристики изделий с добавлением 10% стеклобоя и 10% корунда в зависимости от условий термообработки**

№	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности,		рН	Водопоглощение, %	Температура обработки, °С	Коэффициент размягчения
		при изгибе	при сжатии				
1	2,26	5,0	31,4	12	3,4	50	0,63
2	2,23	3,8	31,4	12	4,5	200	0,75
3	2,31	3,4	31,4	12	5,1	300	0,83
4	2,29	2,5	37,3	12	5,2	400	0,68
5	2,28	2,6	24,5	9	5,4	500	0,96
6	2,11	7,0	47,2	8	5,6	600	0,80
7	1,99	8,7	35,3	7	5,9	700	0,82
8	1,94	6,1	35,3	9	7,5	800	0,96
9	1,92	4,8	39,2	8	8,8	900	0,63

Установлено, что достижение водостойкости изделий (коэффициент размягчения равен 0,80...0,96) наблюдается при термообработке а пределах 500...800 С. Снижение щелочности рН поровой жидкости изделий наблюдается от 600 С и выше.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что введение корунда в количестве 10 % от общей массы исходной смеси приводит к увеличению физико-механических показателей образцов. Наиболее высокими прочностными характеристиками обладает образец, обработанный при 600 С (прочность при сжатии и изгибе – 47,2 и 7,0 МПа, соответственно).

В дальнейшей работе корунд добавляли в количестве 15% от общей массы исходной смеси. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 2.

**Таблица 2 – Физико-механические характеристики изделий с добавлением 10% стеклобоя и 15% корунда в зависимости от условий термообработки**

№	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа		рН	Водопоглощение, %	Температура обработки, °С	Коэффициент размягчения
		при изгибе	при сжатии				
1	2,33	8,5	38,0	12	2,8	50	0,67
2	2,26	3,1	31,4	12	4,4	200	0,75
3	2,27	2,7	45,1	11	4,9	300	0,70
4	2,26	4,1	35,3	10	5,1	400	0,78
5	2,25	4,3	45,1	8	4,7	500	0,80
6	2,01	5,1	53,0	7	6,5	600	0,80
7	1,73	7,9	23,5	7	7,1	700	0,96
8	1,67	7,5	23,5	8	10,0	800	0,95
9	1,79	6,0	31,4	8	8,3	900	0,75

В результате введения корунда в количестве 15 % от общей массы исходной смеси наблюдается дальнейший рост прочностных характеристик. Так, изделия, обработанные при температуре 500...600 С, обладают следующими физико-механическими показателями: прочность при сжатии – 45,1 и 53,0 МПа; при изгибе – 4,3 и 5,1 МПа, соответственно.

Установлено также, что достижение водостойкости образцов (коэффициент размягчения равен 0,80) и снижение щелочности рН их поровой жидкости наблюдается при температуре обработки 500...600 С.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что введение корунда и стеклобоя в формовочную смесь отсева гранитного щебня и силикатного связующего способствует увеличению прочностных характеристик получаемых изделий, а также достижению нейтрального рН поровой жидкости изделий уже при температуре 600 С.

Литература:

1. *Лапин А.В., Бердникова Л.К., Горбунов Ф.К.* Получение строительных изделий из отходов дробления гранитного щебня // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб. – 4 дек. 2020 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 9. – С. 191–194.
2. Вяжущее из отходов динасового огнеупора / *Л.К. Бердникова, А.В. Лапин, Ф.К. Горбунов, В.А. Полубояров* // В сборнике: Химические технологии функциональных материалов Материалы V Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции, посвященной 85-летию Казахского национального университета им. аль-Фараби. Отв. ред. А.И. Апарнев. Новосибирск, 2019. - С. 81-82.
3. Использование техногенного сырья для получения строительных изделий конструкционного назначения / *Л.К. Бердникова, В.А. Полубояров, З.А. Коротаева, Ф.К. Горбунов, А.В. Лапин, В.В. Булаков* // В сборнике: Материалы 6-ой международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции «Химические технологии функциональных материалов». Издательский дом «Қазақ университеті». - 2020. - С. 32-36.

**ИЗУЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ  
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДЕ МИНУСИНСК НА  
ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**

**Э.В. Линд, И.А. Черных**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**[bindelya20@gmail.com](mailto:bindelya20@gmail.com), [i\\_cher12@mail.ru](mailto:i_cher12@mail.ru)**

**Научный руководитель: Е.А. Удальцов, к.в.н. доцент**

*В статье анализируются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от филиала «Минусинская ТЭЦ» АО «Енисейская ТГК (ТГК-13)». В результате исследования было выявлено, что основным источником загрязнения атмосферного воздуха в городе Минусинск, являются дома частного сектора, использующие в качестве топлива, во время отопительного сезона, уголь.*

*The article analyzes air pollutant emissions from Minusinsk CHPP branch of JSC Yeniseyskaya TGK (TGK-13). The study revealed that the main source of atmospheric air pollution in the city of Minusinsk is private sector houses that use coal as fuel during the heating season.*

В Красноярском крае, начиная с 2000 года, идёт устойчивое увеличение загрязнение атмосферного воздуха. Более половины всех

жителей Красноярского края живёт в неблагоприятной экологической обстановке. Уровень загрязнения воздуха в два раза превышает общероссийские показатели. Наибольший вклад вносят такие города, как Норильск, Красноярск и Назарово уровень загрязнения воздуха, в которых характеризуется как очень высокий.

По данным ФГБУ «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» совокупный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу края в 2020 г. составил 2729,2 тыс. тонн, выбросы от стационарных источников составили 2539,6 тыс. тонн [1].

Основными веществами, загрязняющими атмосферу, являются: диоксид серы, оксид азота, оксид углерода, твердые частицы. Перечень ведущих предприятий, основных химических загрязнителей атмосферного воздуха населенных пунктов Красноярского края (по данным государственной статистической отчетности 2-ТП (воздух)) в течение последних 10 лет остается неизменным и включает преимущественно предприятия цветной металлургии и теплоэнергетики.

Тепловые электростанции вносят существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха – 17 % от общего количества выбросов всей промышленности России. В зоне действия теплоэнергетического комплекса образуется повышенный уровень загрязнения воздуха окислами азота, сажей, бенз(а)пиреном и другими веществами. Основное воздействие обусловлено выбросами дымовых труб газоаэрозольных продуктов сгорания органического топлива, оказывающее негативное воздействие на окружающую природную среду и население.

Город Минусинск – крупное муниципальное образование на юге Красноярского края, расположен в пределах Минусинской впадины. Основу промышленного комплекса города составляет пищевая промышленность.

Ежегодно Минусинск и близлежащая к нему столица Хакасии Абакан, практически не имеющие вредного производства, входят в рейтинг самых загрязненных городов. По данным Государственного доклада в 2020 г. уровень загрязнения г. Минусинска характеризовался как «очень высокий». Стандартный индекс (СИ) – 47,57 (по бенз(а)пирену); наибольшая повторяемость (НП) превышения ПДКм.р. — 1,2 % (по оксиду углерода и взвешенным веществам). Основной вклад в уровень загрязнения атмосферы города внесли взвешенные вещества, оксид углерода, диоксид азота, формальдегид и бенз(а)пирен.

Начиная с 2007 года, содержание этого вещества в воздухе Минусинска превышает содержание его в воздухе Красноярска. Бенз(а)пирен является наиболее типичным канцерогеном окружающей среды, оказывает также мутагенное воздействие. Чрезвычайно опасен даже при сверхмалых концентрациях, так как имеет свойство накапливаться. Присутствует в газообразных выбросах промышленности, выхлопах автомобилей, в табачном дыме, в продуктах сгорания пищи и др. [2]

По данным, министерства природных ресурсов и экологии республики Хакасия, уровень загрязнения атмосферы в этих городах в большей степени связан с печным отоплением и ТЭЦ. Наряду с печным отоплением и котельными состояние атмосферы портит растущее количество автотранспорта.

Одним из источников загрязнения в городе является Минусинская ТЭЦ. Предприятие имеет 48 источников загрязнения, из них: организованных – 28, неорганизованных – 20. Количество выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ – 28, из них: твердых – 15, жидких и газообразных – 13. Суммарные выбросы загрязняющих веществ Минусинской ТЭЦ в атмосферный воздух города составили 3463,847 т/год. Из 28-ми загрязняющих веществ, выбрасываемых источниками выбросов на основной площадке ТЭЦ, 99,91% годовых выбросов в атмосферный воздух составляют восемь ингредиентов, представляющие собой, в основном, продукты сгорания твердого топлива: диоксид азота – 1345,06 т/год, оксид азота – 218,57 т/год, сажа – 17,68 т/год, диоксид серы – 1493,37 т/год, оксид углерода – 52,79 т/год, пыль неорганическая с содержанием кремния 70-20% – 312,53 т/год, бенз(а)пирен – 0,00088 т/год [3].

Город Минусинск располагается в Минусинской котловине, находящейся в зоне температурной инверсии, иными словами, застоя грязного холодного воздуха. Данная географическая особенность расположения города, которая защищает от сильных степных ветров, служит причиной тяжелой экологической обстановки в городе.

Частный сектор занимает около 76% от общей площади города, которая составляет 60,5 кв. км. Подавляющее количество домов отапливается индивидуальным печным отоплением, используя некачественный и относительно дешевый уголь. Так как контроль и нормирование выбросов загрязняющих веществ от индивидуальных жилых застроек невозможен, следовательно, основным источником загрязнения атмосферного воздуха считаются дома частного сектора во время отопительного сезона. Также углем отапливается большинство коммерческих предприятий.



С каждым годом увеличивается тенденция развития жилищного строительства, ориентированного в большей мере на индивидуальную застройку, что ведет к увеличению частного сектора. В следствие чего экологическая обстановка в городе с каждым годом будет только ухудшаться.

#### Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году» — Красноярск, 2021.
2. Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VIII Всерос. науч. - практ. конф. творческой молодежи, посвященной 55-летию запуска первого искусственного спутника Земли (9–14 апреля 2012 г., Красноярск): в 2 т. Т. 1. Технические науки. Информационные технологии. Сообщения школьников / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2012. – 438 с.
3. Проект нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) загрязняющих веществ в атмосферный воздух для филиала «Минусинская ТЭЦ»

## **БЕЗОТХОДНОЕ ПРОИЗВОДСТВО: ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СУХОГО РАЗМОЛА ОТРУБЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БИОДОСТУПНОСТИ БЕЛКОВО-ВИТАМИННОЙ МУКИ (БВМ)**

**А.Ю. Малахова<sup>1</sup>, М.В. Леган<sup>1</sup>, Н.Л. Лукьянчикова<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН  
[alineks.07@mail.ru](mailto:alineks.07@mail.ru)

*Одним из перспективных методов экологизации сельского хозяйства является применение безотходного производства за счет дальнейшего использования побочного продукта мукомольного производства – отрубей. Отруби, главным образом, применяются в качестве кормовых ингредиентов, но толстые клеточные стенки алейронового слоя препятствуют полной усвояемости компонентов. Представляет интерес технология повышения их биодоступности без разрушения витаминов и антиоксидантов. Цель данной работы – получение белково-витаминной муки обогащенной компонентами алейронового слоя (витамины, антиоксиданты, белок). Результатом работы является изучение возможности экологизации сельского хозяйства за счет рационального использования ресурсов мукомольного производства, а также получение белково-витаминной муки, на основе которой в дальнейшем, можно создавать продукты лечебно-профилактического направления.*

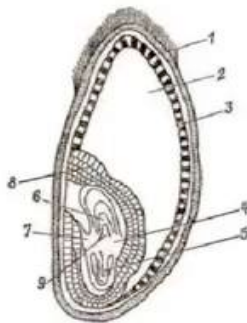
*One of the promising methods of greening agriculture is the use of waste-free production through the further use of a by-product of milling production - bran. The bran is mainly used as feed ingredients, but the thick cell walls of the aleurone layer prevent the components from being fully digestible. The technology of increasing their bioavailability without destroying vitamins and antioxidants is of interest. The purpose of this work is to obtain protein-vitamin flour enriched with components of the Aileron layer (vitamins, antioxidants, protein). The result of the work is the study of the possibility of greening agriculture through the rational use of the resources of flour-grinding production, as well as the production of protein-vitamin flour, on the basis of which, in the future, it is possible to create products of a therapeutic and prophylactic direction.*

Важнейшим направлением экологизации сельского хозяйства является *интенсивный метод* охраны природной среды, который заключается в предупреждении негативного воздействия на нее путем устранения не следствия (выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух), а причин, например, несовершенства технологии и сырья. Основные принципы такого *интенсивного метода* предусматривают как использование альтернативных источников энергии (солнечной, геотермальной и др.) и создание продукции с длительным сроком службы, так и экономию сырья и энергии через использование замкнутых и безотходных технологий.

Таким образом, практически безотходные технологии предполагают рациональное использование природных ресурсов, при этом отходы производства сводятся к минимуму. Одним из перспективных методов экологизации сельского хозяйства является применение практически безотходного мукомольного производства за счет дальнейшего использования его побочных продуктов. Так, при производстве муки на мукомольных предприятиях образуется большое количество отходов, отрубей (в случае переработки пшеницы – до 20% от веса зерна).

Отруби представляют собой часть зерна, содержащие в себе внешние оболочки, включая алейроновый слой, а также зародыш.

Алейроновый слой богат полноценным белком, макро- и микроэлементами, витаминами группы В и Е, антиоксидантами, пищевыми волокнами [1]. Но все эти вещества практически не усваиваются в организме человека и животных, так как толстые клеточные стенки алейронового слоя не расщепляются пищеварительными ферментами. Поэтому представляет интерес разрушение клеток алейронового слоя, в которых заключены питательные вещества, для повышения их биологической доступности (биодоступности) для человека, птиц и животных.



**Строение зерновки пшеницы:**

- 1 - околоплодник сросшийся с кожурой;
- 2 - эндосперм;
- 3 - алейроновый слой;
- 4 - зародыш;
- 5 - корешок;
- 6 - почечка;
- 7 - эпибласт;
- 8 - щиток;
- 9 - конус нарастания

Рис. 1 – Строение пшеничного зерна

В нашем исследовании путем переработки отрубей получается *белково-витаминная мука (БВМ)*, которая представляет собой фракцию с размером частиц менее 140 мкм, обогащенную компонентами алейронового слоя, с высокой сохранностью витаминов, белка и ферментативной активности. В дальнейшем, *БВМ* можно использовать для приготовления продуктов лечебно-профилактического направления (белково-витаминные добавки, пребиотики, антиоксиданты), способствующие поддержанию общего состояния здоровья птиц, животных и человека.

*Целью работы* является применение метода сухого размола отходов мукомольного производства (отрубей) и повышение их биодоступности для получения *белково-витаминной муки*, обогащенной компонентами алейронового слоя.

*Материалы и методы.*

Для повышения биодоступности необходимо разрушить клеточные стенки алейронового слоя, при этом обеспечив сохранность питательных и биологически активных веществ. Описаны различные способы разрушения клеточных стенок алейронового слоя: автоклавирование, микронизация, экструдирование, кавитация и сухой размол [2, 3]. Однако все способы (кроме размола) предполагают высокотемпературное воздействие, что разрушает витамины и антиоксиданты, снижает ценность белка и инактивирует эндогенные ферменты.

Для повышения биодоступности *БВМ* нами применялись следующие методы: сухой размол и фракционирование пшеничных отрубей на ситах.

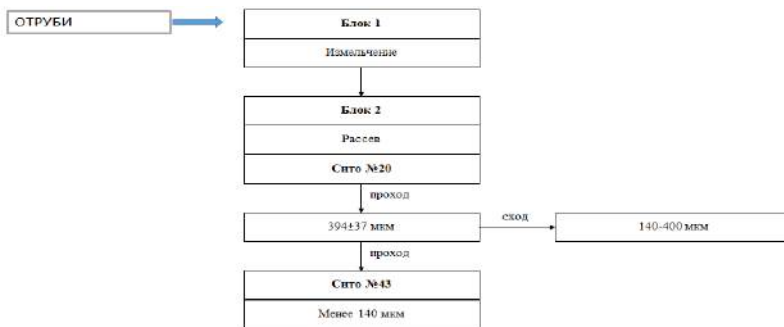


Рис. 2 – Схема получения белково-витаминной муки

### *Полученные результаты.*

Исследование показало, что более 60% частиц в БВМ имеют размер до 45 мкм, то есть меньше размера алейроновой клетки, который составляет (37-65)х(25-75) мкм [4], что свидетельствует о разрушении клеточных стенок. При этом данная фракция БВМ содержала на 40% больше белка и витаминов, чем ее крупная фракция.

Для оценки эффективности сухого размола при получении БВМ, был проведен эксперимент, в котором БВМ использовалась в качестве кормового ингредиента в рационе несушек-перепелов. Было установлено, что использование БВМ в количестве 7 % от рациона, позволило увеличить яйценосность птицы на 4,59 % по сравнению с контролем, интенсивность яйцекладки – на 3,0 %, массу яиц – на 4,63 % при одновременном уменьшении затрат корма на 26,74 % [5].

### *Выводы*

Таким образом, в работе обоснована возможность экологизации сельского хозяйства за счет рационального использования продуктов мукомольного производства.

Показано, что применение метода сухого размола пшеничных отрубей повышает биодоступность *белково-витаминной муки*, обогащенной компонентами алейронового слоя, на основе которой можно создавать продукты лечебно-профилактического направления (белково-витаминные добавки, пребиотики, антиоксиданты).

### Литература

1. Лукьянчикова Н.Л., Скрябин В.А., Табанюхов К.А. Особенности состава отрубей пшеницы и ржи и их роль в профилактике хронических заболеваний человека // Инновации и продовольственная безопасность. – 2020. – №4(30). – С.41–59.

2. Лукьянчикова Н.Л., Чиркин А.П., Табанюхов К.А. Физические и биохимические методы повышения биологической ценности ржаных и пшеничных отрубей с целью получения кормов и пищевых продуктов лечебно-профилактического назначения // Научное обеспечение технологического развития и повышения конкурентоспособности в пищевой и перерабатывающей промышленности. – 2020. – С.34–38.

3. Y. Hemery, Rouau X., Lullien V., Pellerin C. Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality // Journal of Cereal Science. – 2007. – V.46. – P. 327 – 347.

4. K. Khan, P. K. Shewry. Wheat // Chemistry and Technology, Published by Elsevier Inc. – 2009. – 480 С.

5. Фракционированная белково-витаминная мука из пшеничных отрубей в рационах несушек перепелов / В. А. Рогачёв, О. Г. Мерзлякова, В. Г. Чегодаев, Н.Л. Лукьянчикова.// Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. –2021. – №11(196). – С.40–50.

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРО И ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОПРИВОДОВ МАШИН**

**И.В. Молотков, Н.А. Маслов**

**Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, [namaslov@mail.ru](mailto:namaslov@mail.ru)**

**Научный руководитель: Маслов Н.А., к.т.н., доцент**

*В работе выявлены источники пожара и взрывоопасности путевых машин, оснащенных гидроприводами, разработаны рекомендации для повышения пожаро и взрывобезопасности при эксплуатации путевых машин, приведен обзор средств пожаротушения мобильных машин, разработаны системы пожаротушения путевых машин.*

*The paper identifies sources of fire and explosion hazards of track machines equipped with hydraulic drives, develops recommendations to improve fire and explosion safety in the operation of track machines, gives an overview of fire extinguishing means of mobile machines, and develops fire extinguishing systems for track machines.*

Безопасная эксплуатация гидроприводов подъемно-транспортных, путевых, строительных, дорожных и других машин предполагает наличие средств пожаротушения и соблюдение мер пожарной безопасности. Случаи возгорания сложных и дорогостоящих машин не единичны. Например, в 2019 г. на Западно-Сибирской железной дороге

произошло возгорание путевой машины “Динамик-подбивочный экспресс”. Расчетная стоимость ремонта машины составила около 200 млн. руб.

Цель работы - разработка методического и материального обеспечения пожаро и взрывобезопасности гидроприводов путевых машин (далее - ПМ).

Задачи работы: выявление источников пожаро и взрывоопасности ПМ, оснащенных гидроприводами; разработка рекомендации для повышения пожаро и взрывобезопасности при эксплуатации ПМ; обзор средств пожаротушения мобильных машин; разработка систем пожаротушения ПМ.

Оценку пожарной опасности веществ и материалов следует производить по ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). По этому стандарту вещества и материалы условно разделяют на четыре группы: газы, жидкости, твердые вещества и пыль. Для каждой группы существуют 20 показателей, характеризующие пожаро и взрывоопасность веществ и материалов (например, группа горючести, температуры вспышки, воспламенения и другие показатели). Этот ГОСТ дает рекомендации по средствам и способам тушения веществ и материалов. Например, индустриальное масло при возгорании целесообразно тушить углекислотным огнетушителем. Углекислота блокирует кислород, необходимый для поддержания горения, и огонь постепенно потухает. В том случае, когда возгорание гидравлического масла (далее - масло) занимает не слишком большую площадь, подходит и порошковый огнетушитель.

На ПМ пожаро и взрывоопасными являются рабочие жидкости (масла), дизельное топливо и их пары. Пожароопасными могут быть и применяемые в конструкции ПМ материалы. Некоторыми источниками пожаро и взрывоопасности ПМ являются негерметичность гидропередат и топливной системы.

Рекомендациями для повышения пожаро и взрывоопасности ПМ является применение пассивных и активных технологий (Рисунок 1). Пассивные технологии заключаются, например, в правильном проектировании и эксплуатации тепловой защиты гидропередат, в выборе и применении пожаро и взрывобезопасных рабочих жидкостей, в обеспечении герметичности гидроприводов при создании и эксплуатации ПМ. Активными технологиями являются системы пожаротушения, которые должны находиться во включенном состоянии и проходить периодические проверки. Целесообразно совместное применение пассивных и активных технологий на стадиях создания ПМ и при ее эксплуатации. Такой современный и ответственный подход

позволяет качественно обеспечить пожаро и взрывобезопасность гидроприводов и машины в целом.



Рис.1 – Некоторые технологии обеспечения пожаро и взрывобезопасности гидрофицированных машин

Выполнен обзор средств пожаротушения машин. Установки систем пожаротушения бывают традиционными и модульными. Традиционные установки обычно применяют для помещений и машин больших размеров (например, кораблей). Модульные установки используют в условиях ограниченного пространства. Блочно-модульная система пожаротушения состоит из отдельных элементов, объединенных линиями связи. Система имеет возможность расширения путем установки дополнительных элементов (блоков, модулей, узлов, плат и т.п.) и (или) подключения внешних элементов. Выявлены следующие особенности систем пожаротушения. Традиционные водяные системы имеют сложность монтажа, требуют установку громоздкого насосного оборудования. Пенные системы сильно загрязняют окружающую среду. Аэрозольные системы имеют недостаточную эффективность на открытом воздухе. Газовые - опасны для здоровья человека.

В результате сравнительного анализа характеристик, сделан вывод о том, что в ПМ наиболее предпочтительно использовать порошковые системы пожаротушения, выполненные по блочно-модульной схеме.

Разработаны варианты размещения элементов модульных систем пожаротушения на путевых машинах: выправочно-подбивочно-отделочной ВПО-3-3000 (Рисунок 2), выправочно-подбивочно-рихтовочных Дуоматик 09-32 и Унимат 08-475, щетнеочистительной РМ-2002.

На рисунке 2 обозначены элементы системы пожаротушения (А – модуль порошкового пожаротушения; В – исполнительный блок, тип 1; С – исполнительный блок, тип 2; D – блок индикации и управления; Е – исполнительный блок коммутационный) и элементы машины (1 – основная и дополнительная дизель-генераторные установки; 2,6 –

передняя и задняя кабины управления; 3 – ферма; 4 – механизм перемещения виброплит; 5 – подъемно-рихтовочное устройство; 7 – насосная станция; 8 – активные рельсовые щетки; 9 – уплотнители откосно-плечевых и межпутных зон балластной призмы; 10,11 – задняя и передняя ходовые тележки; 12 – планировщики; 13 – подборщик балласта; 14 – основные виброплиты; 15 – балластный плуг; 16 – дозатор).

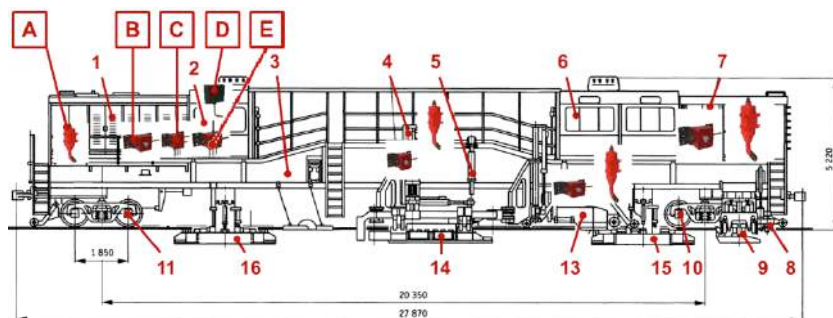


Рис.2 - Предлагаемый вариант размещения элементов модульной системы пожаротушения на путевой машине ВПО-3-3000

Модуль А (порошкового пожаротушения) предназначен для тушения пожаров в пожароопасных отсеках транспортных средств: класса А (горение твердых веществ); класса В (горение жидкостей); класса С (горение газов); класса Е (горение электрооборудования под напряжением до 1000В).

Блок В (исполнительный, тип 1) обеспечивает: контроль скачкообразного повышения температуры с помощью дифференциально-максимального пожарного извещателя, состоящего из последовательно соединенных термопар; формирование стратегии управления средствами пожаротушения на основе анализа признаков возгорания.

Блок С (исполнительный, тип 2) обеспечивает: контроль шлейфов сигнализации и линий подключения средств пожаротушения на обрыв и короткое замыкание; контроль исправности средств пожаротушения; приём сигналов от пожарных извещателей. Модуль имеет: программируемый алгоритм работы с возможностью резервирования средств пожаротушения для обеспечения ликвидации повторного возгорания; возможность подключения нескольких средств пожаротушения; возможность подключения различных типов пожарных извещателей (теплового линейного - термокабель, дымового точечного,



дымового аспирационного, пламени); несколько шлейфов сигнализации.

Блок D (индикации и управления) обеспечивает: контроль состояния подключенных исполнительных блоков в реальном времени; оперативное информирование экипажа ПМ о работе системы и сигнализацию о возникновении нештатных ситуаций; энергонезависимую память; управление исполнительными устройствами; запуск модулей пожаротушения в автоматическом или ручном режиме; передачу по каналу GSM информации о нештатных событиях с привязкой по времени и координатам на компьютер или телефон диспетчера (при комплектации с блоком связи и определения координат).

Блок E (исполнительный коммутационный) имеет выходы управления исполнительными устройствами: несколько выходов типа «сухой контакт» для управления отключением электропитания и останковкой двигателя ПМ, либо отключением электропитания и перекрытием топливопровода; выход с коммутацией напряжения питания для подключения светозвукового устройства.

Разработка системы пожаротушения машины ВПО-3-3000 выполнена с учетом высокой степени гидрофикации ее узлов. Блок D (индикации и управления), С (исполнительный, тип 2) и E (исполнительный коммутационный) размещены в передней кабине управления ПМ. Блоки В (исполнительные, тип 1) и модули А (порошкового пожаротушения) размещены в местах возможного возгорания (силовая установка и элементы гидроприводов ПМ).

#### Литература:

1. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : Справочник / Под ред. А.И.Баратова, А.Я. Корольченко. – М.: Издательство «Химия», 1990. – 384 с.
2. Путевые машины: Учебник / М.В. Попович, В.М. Бугаенко. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 820 с.
3. Машина выправочно-подбивочно-рихтовочная Дуоматик 09-32. Каталог деталей и сборочных единиц // ОАО «Российские железные дороги». Проектно-технологическо-конструкторское бюро по пути и путевым машинам. - Москва, 2005. – 250 с.

## КОНЦЕПТ МНОГОРАЗОВОГО СОРБЕНТА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ПОЧВУ

**В.В. Ларичкин, А.О. Нарушев, Н.И. Ларичкина**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, andrey\_auf@mail.ru**

*Постановлением правительства Российской Федерации от 21.08.2000 года №613 «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов» определены основные требования к разработке планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов, а также организации материально-технического обеспечения. Во исполнении постановления, альтернативой существующим сорбционным материалам предлагается концепт капсульного поглотителя на основе силикагеля, лигноцеллюлозного сырья, неорганического поглотителя и геотекстиля, обладающий такими качествами, как простота и удобство транспортировки, применения, регенерации и рациональной утилизации.*

*Decree of the Government of the Russian Federation of August 21, 2000 No. 613 "On urgent measures to prevent and eliminate emergency spills of oil and oil products" the basic requirements for the development of plans for the prevention and elimination of emergency spills of oil and oil products, as well as the organization of logistics. In the execution of the order, alternative to existing sorption materials a concept of a capsule absorber based on silica gel, lignocellulosic raw material, inorganic absorber and geotextile is proposed, possessing such qualities as simplicity and ease of transportation, applications, regeneration and rational disposal.*

Производственная деятельность нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий, начиная от разведки месторождения и кончая производством нефтепродуктов, регулярно сопровождается выбросами и сбросами вредных веществ в атмосферу, литосферу и гидросферу. Наиболее опасными для окружающей среды и различных экологических систем являются аварийные разливы нефти и нефтепродуктов. За последние 25 лет в Российской Федерации в результате крупнейших аварийных разливов, суммарная масса разлившейся нефти и нефтепродуктов по официальным данным составила более 145,3 тыс. тонн, из них 84% (122,3 тыс. тонн) выбросов пришлось на почву, при этом площадь загрязнения составила более 287 гектаров. Последняя крупная авария произошла 14 мая 2021 года в Пуровском районе Ямало-Ненецкого Автономного Округа, в результате которого случился крупный разлив нефти на Карамовском нефтяном месторождении, где прорвало внутрипромысловый трубопровод. В окружающую среду попало более 3 тыс. кубометров нефти [1]. Поэтому

поиск новых экономически и экологически эффективных методов ликвидации аварийных разливов на почву является актуальной задачей.

В действующем в нашей стране природоохранном законодательстве указано, что нефтедобывающие и нефтеперерабатывающие компании обязаны принимать меры по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов.

Современные технологии ликвидации аварийных разливов нефти на почву подразделяются на 4 основных метода: термический, биологический, механический и физико-химический. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, как по экономическим критериям, так и по эффективности локализации и минимизации ущерба экологии. В работе рассматривается физико-химический метод, при котором при ликвидации нефтяного разлива используются различные сорбенты и диспергенты [2-4].

В настоящее время известно более 200 различных поглотителей, которые используются для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов – начиная от измельченных початков кукурузы и заканчивая многофазными бионеорганическими нано-композиционными материалами [5]. При ликвидации разливов нефти российские специалисты руководствуются постановлением правительства от 2000 года №613 «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов». По данным МЧС России во всех местах хранения и добычи нефти должны быть собственные подразделения для ликвидации разливов. Также компании обязаны проводить аттестацию указанных формирований в соответствии с законодательством Российской Федерации, оснащать их специальными техническими средствами или заключать договоры с профессиональными аварийно-спасательными службами. При случаях разлива организации обязаны немедленно оповещать соответствующие органы государственной власти и местного самоуправления и организовывать работу по их локализации и ликвидации. Для этого у них обязательно должен быть резерв финансовых средств и материально-технических ресурсов [6].

Во исполнение Постановления правительства Российской Федерации альтернативным средством существующим сорбентам, нефтяным и нефтеперерабатывающим компаниям предлагается разрабатываемый на кафедре инженерных проблем экологии НГТУ капсульный сорбент, состоящий из волокнистых и гранулированных сорбентов, заключенных в оболочку, устойчивый к агрессивным средам и внешним факторам.

Схема состава разрабатываемого сорбента представлена на рис. 1. Волокнистые сорбенты обладают более высокой скоростью сорбции, что снижает время реагирования сорбента, а гранулированные, значительно большей емкостью, что позволяет наиболее эффективно устранить аварийные разливы нефтепродуктов, нефти и иных агрессивных веществ [7]. При разработке эффективного поглотителя, важными целями было добиться: простоты и удобства транспортировки, применение для различных видов загрязнителей, возможность регенерации и рациональной утилизации вторичного сырья. Этому может успешно содействовать помещение смеси сорбентов в оболочку.

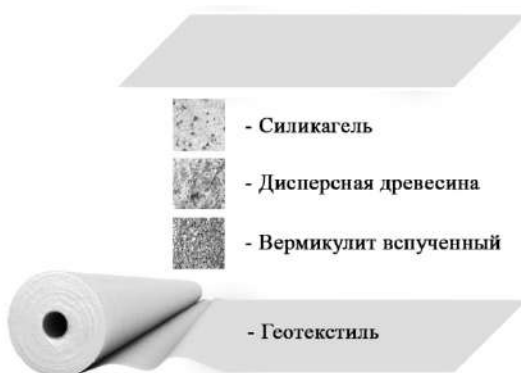


Рис. 1 – Состав разрабатываемого сорбента

В качестве гранулированного поглотителя предлагается использовать ионообменный сорбент – силикагель, а волокнистым поглотителем может быть любой неорганический сорбент или лигноцеллюлозное сырье, зачастую представляющее отходы древесного и травянистого происхождения, включая полуфабрикаты целлюлозно-бумажной промышленности и переработки древесины, макулатуру. Однако с экономической точки зрения использование дешёвых неорганических сорбентов может быть выгодно, но с экологической не достаточно эффективно, так как в силу своей низкой емкости (70...150 % относительно нефти) они плохо удерживают бензин, дизельное топливо и керосин [8]. Поэтому в совокупности с использованием лигноцеллюлозного сырья и гранулированного синтетического сорбента, в нашем случае силикагеля, эффективность получаемого поглотителя может возрасти в разы. В качестве волокнистых сорбентов предлагается выбирать наиболее эффективные с точки зрения

экономического фактора сорбенты – вермикулит и отходы деревообрабатывающих предприятий – дисперсная древесина.

В качестве оболочки для поглотителей выступает геотекстиль. Даже при намокании он не расслаивается, поскольку слои надежно соединены между собой. Он устойчив к воздействию кислот, щелочей и других агрессивных веществ, содержащихся в почве и воде [9].

Одно из весомых преимуществ разрабатываемого сорбента - это повторное применение, что актуально для разных отраслей промышленности. Перед регенерацией капсульный сорбент должен быть очищен от адсорбированных примесей путем помещения его под пресс, или в центрифугу, для лучшей экстракции примесей. Правильно выполненный на специализированном оборудовании процесс позволяет практически полностью восстановить исходные характеристики материала. Выделенные при этом примеси утилизируются или перерабатываются с учетом их физико-химических характеристик и степени опасности. Отметим, что вследствие использования геотекстиля капсульный сорбент не нуждается в серьезной очистке от грунта и растений ввиду их малого количества. К тому же исходная рулонная упаковка (рис. 2) позволяет удобно хранить, транспортировать, а самое главное оперативно и эффективно ликвидировать разлитую нефть и нефтепродукты.



Рис. 2 – Рулонная упаковка сорбента

Благодаря высокой гигроскопичности, пористости и большой удельной поверхности, разрабатываемый капсульный сорбент способен впитывать нефть и нефтепродукты с любых поверхностей суши – почвы, болот и др. Важное преимущество разрабатываемого вида сорбента, что он не теряет своих свойств при отрицательных температурах и безопасен для окружающей среды.

На момент публикации статьи ведутся лабораторные эксперименты по подбору оптимально эффективных характеристик используемых компонентов, таких как размер гранул силикагеля, процентное соотношение силикагеля, вермикулита и лигноцеллюлозного сырья, плотность и размер перфорации геотекстиля, размеры ячеек и самого рулона разрабатываемого капсульного сорбента. Результаты физико-химических исследований эффективности сорбента для различных видов загрязнений будут опубликованы в последующих научных публикациях.

#### Литература:

1. Разлив нефти на Ямале [Электронный ресурс] // Сибирь-Реалии. – URL: <https://www.sibreal.org/a/31255519.html> (дата обращения: 20.09.2021).
2. Альхименко А.И. Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними // СПб: ОМ-Пресс. – 2004. – С. 113.
3. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // М.: Ин-октаво. – 2015. – С. 368.
4. Методы ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс] // Портал для недропользователей. – URL: <https://dprom.online/oilngas/metody-likvidatsii-razlivov-nefti-i-nefteproduktov/> (дата обращения: 21.10.2021).
5. Taylor, D.R. Bleaching. Bailey's Industrial Oil and Fat Products // John Wiley & Sons. – 2005. – 6th edition. – P. 285.
6. Ликвидация разливов нефти [Электронный ресурс] // Портал для недропользователей. – URL: <https://dprom.online/oilngas/likvidatsiya-razlivov-nefti/> (дата обращения: 29.09.2021).
7. Сорбенты и их применения при ликвидации разливов нефтепродуктов [Электронный ресурс] // Дилер производителя оборудования ЛАРН. – URL: <https://www.larn77.ru/article/detail55.htm> (дата обращения: 27.09.2021).
8. Андреев А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. – 2014. – № 10. – С. 148-155.
9. Геотекстиль: сферы его применения и ключевые характеристики [Электронный ресурс] // ООО «СТРОЙКОМ-АГРО». – URL: <https://stroykom-agro.com.ua/a433721-geotekstil-sfery-ego.html> (дата обращения: 20.10.2021).

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ-УНОСА ТЭЦ-5 г. НОВОСИБИРСКА И РАЗЛИЧНЫХ АКТИВАТОРОВ ТВЕРДЕНИЯ

А.П. Онипченко<sup>1,2</sup>, Л.К. Бердникова<sup>1</sup>,  
Гириш М.В.<sup>1,2</sup>, Горбунов Ф.К.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского  
отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [na.oni@yandex.ru](mailto:na.oni@yandex.ru)

Научный руководитель: Горбунов Ф.К.<sup>1,2</sup> к.т.н., доцент

*В работе проведено исследование физико-химических характеристик золы-уноса с ТЭЦ-5 г. Новосибирска от сжигания бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна и определены возможности ее использования в качестве источника вторичного ресурса для получения строительных материалов, а также для снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. Был проведен подбор компонентного состава и сравнительный анализ образцов строительных изделий на основе золы-уноса и различных активаторов твердения. Получены образцы прочностью на сжатие до 20 МПа.*

*In this paper, a study of the physico-chemical characteristics of fly ash from the Novosibirsk CHP-5 from the burning of brown coal from the Kansk-Achinsk coal basin was carried out and the possibilities of its use as a source of secondary resource for the production of building materials, as well as to reduce the anthropogenic load on the environment were determined. The selection of the component composition and comparative analysis of samples of construction products based on fly ash and various hardening activators were carried out. Samples up to 20 MPa compressive strength were obtained.*

Современная энергетика наносит ощутимый вред окружающей среде, ухудшая условия жизни людей. Золоотвалы требуют значительные территории, являются источником загрязнения окружающей среды и очагами скопления тяжёлых металлов. Одним из возможных путей решения данной проблемы является утилизация отходов, то есть возвращение в материальный кругооборот, что имеет важное экологическое, экономическое и энергосберегающее значение.

Зола-уноса с ТЭЦ-5 г. Новосибирска обладает неудовлетворительными характеристиками при использовании взамен части вяжущего в производстве бетонов. Поэтому эти отходы используют как частичный заменитель песка, которые не уступают бетонам на основе обычного цемента [1].

Методом рентгенофазового анализа выявлено, что в образце присутствует большое количество фаз, рефлексы которых

перекрываются, усложняя процесс интерпретации. С помощью программы Toras [2] методом Ритвельда [3,4] был проведен количественный анализ золы, результаты которого представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Химический состав золы-уноса ТЭЦ-5**

Общее поля отбора (февраль 2021г.)								
Фаза	CaO	SiO <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>	MgO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Ca <sub>2</sub> FeAlO <sub>5</sub>	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Концентрация, вес, %	13,37	37,49	5,36	6,59	2,91	17,88	9	7,4

Согласно таблице 1, основными компонентами являются оксиды кальция и кремния, а также алюминат трикальция. Исследуемая зола-уноса является основной (содержание оксида кальция более 10% по массе), скрытоактивной, т.е. самостоятельными вяжущими свойствами она не обладает и требует активаторы твердения.

Исследования гранулометрического состава показали, что в золе около 90% частиц размером от 1 до 100 мкм. Наличие такого большого количества микродисперсных частиц должно оказывать положительное влияние на пластичность формовочной массы и прочностные характеристики готовых строительных материалов.

Методом БЭТ с внутренним эталоном [5] определена удельная поверхность золы-уноса с общего поля отбора, которая составляет 460 м<sup>2</sup>/кг, насыпная плотность – 1,15 кг/м<sup>2</sup>.

По данным электронно-микроскопических исследований, частицы имеют сферическую форму, частично агрегированы.

Образцы получали методом полусухого прессования для этого золу-уноса смешивали с активатором твердения (вода, 10%-й раствор CaCl<sub>2</sub>). Соотношение зола-уноса:активатора твердения варьировалось. Для предварительного анализа методом полусухого прессования (20, 40 и 80 МПа) были изготовлены образцы. Образцы подвергались сушке в нормальных условиях в течение 28 суток, после чего их испытывали на прочность при сжатии ГОСТ 10180–2012 [6].

Часть образцов были получены на основе воды. При испытании образцов наблюдали (таблица 2), что с увеличением количества воды и давления прессования увеличиваются прочностные характеристики, но в течение месяца они падают (таблица 3). Исходя из анализа



приведенных исследований рекомендуемое соотношение реагентов 8:1 мас.ч. и давление прессования 80 МПа.

**Таблица 2 – Прочность образцов (активатор твердения вода, возраст образцов 7 суток)**

№	Давление прессования, МПа	Соотношение зола-уноса: вода, мас.ч.	Прочность при сжатии, МПа
1	40	20,0:1	3,6
2	40	16,6:1	3,7
3	40	13,3:1	6,7
4	40	10,0:1	8,6
5	80		9,0
6	40	8,0:1	9,6
7	80		17,1

**Таблица 3 – Изменение прочности (активатор твердения вода)**

№	Давление прессования, МПа	Время твердения, сут.	Прочность при сжатии, МПа
7	80	1	20,3
		2	17,8
		7	17,1
		14	15,7
		28	13,1

Для образцов, полученных с использованием в качестве активатора твердения 10%-ого раствора хлорида кальция (таблица 4), с увеличением давления прессования прочность при сжатии возрастает.

**Таблица 4 – Прочность образцов (активатор твердения 10%-й раствор CaCl<sub>2</sub>, возраст образцов 7 суток)**

№	Давление прессования, МПа	Соотношение зола-уноса: 10% р-р CaCl <sub>2</sub> , мас.ч	Прочность при сжатии, МПа
8	20	8:1	13,4
9	40		15,4
10	80		20,3

Максимум фиксируется при давлении прессования 80 МПа, соотношении 8:1 мас.ч. Хлорид кальция используются в качестве

ускорителя в процессе гидратации вещества, что позволяет быстро схватывать и получать материалы с высокой начальной прочностью. Наблюдается набор прочности в течении 7 суток с последующим выходом на плато (таблица 5).

**Таблица 5 – Изменение прочности (активатор твердения 10%-й раствор CaCl<sub>2</sub>)**

№	Давление прессования, МПа	Время твердения, сут.	Прочность при сжатии, МПа
10	80	1	13,9
		2	17,6
		7	20,3
		14	20,3
		28	20,1

Таким образом было проведено исследование физико-химических характеристик золы-уноса с ТЭЦ-5 г.Новосибирска от сжигания бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна, определен фазовый состав, распределение частиц по размерам, охарактеризованы вяжущие свойства. Определено, что перспективным способом утилизации золы-уноса является ее использование в качестве источника вторичного ресурса для получения строительных материалов.

Исходя из приведенных исследований, был определен оптимальный состав формовочной смеси 8:1 мас.ч. и оптимальное давление прессования 80 МПа. При использовании воды в качестве активатора твердения на раннем этапе наблюдается высокие показатели прочности, однако, к концу месяца они снижаются примерно в 1,5 раза. На основе 10%-ого раствора хлорида кальция происходит набор прочности образцов в течение первых 7 суток

#### Литература

1. Строительева А. Ф. Серенко, Е. А. Влияние условий твердения на оптимальное количество золы при замене песка и на микроструктуру цементных бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006/3. – С. 130-136.
2. Topas 4.2 User Manual // Bruker AXS GmbH. – 2009, Karlsruhe, Germany. – P.72.
3. Rietveld H.M. Line Profiles of Neutron Powder-diffraction Peaks for Structure Refinement // Acta Crystallogr. 1967. – Vol. 22. – P. 151–152.
4. Rietveld H.M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures, J. Appl // Crystallogr. – 1969. – iss. 2. – P. 65–71.

5. Буянова, Н. Е. Определение удельной поверхности дисперсных и пористых материалов / Н.Е. Буянова, А. П. Карпов, Ю.А. Алабужев. – Новосибирск: Институт катализа СО АН СССР. 1978. – 74 с.

6. ГОСТ 10180–2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. = Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. - Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартинформ, 2018.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВАЮЩИХ КОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ФОТОКАТАЛИЗАТОРОВ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Д.А. Романов<sup>1</sup>, В.Н.Панченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [intregal38@mail.ru](mailto:intregal38@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 5

Научный руководитель: Панченко В.Н., к.х.н.

*На поверхности фотокатализатора  $TiO_2$  последовательным нанесением магнийалюминиевого комплекса и  $TiCl_4$  был синтезирован титан-магниевоый катализатор (ТМК). С использованием полученных ТМК были приготовлены полимерные композиты методом полимеризации этилена *in situ*. Изучено влияние содержания полиэтилена в композите на физико-химические характеристики.*

*A titanium-magnesium catalysts (TMCs) were synthesized on the surface of the  $TiO_2$  photocatalyst by successively processing a magnesium-aluminum complex and  $TiCl_4$ . Polymer composites were prepared using the obtained TMCs by *in situ* polymerization of ethylene. The influence of the polyethylene content in the composite on the physico-chemical characteristics has been studied.*

Случаи разлива топлива на поверхности воды уже многие десятилетия носят повсеместный, мировой характер. После сбора основной массы водно-топливной смеси боновыми рукавами, поверхность воды остаётся загрязнённой топливной плёнкой. Токсичная плёнка ограничивает доступ кислорода к воде, действует губительно на донных обитателей.

Очистка воды фотокаталитическими методами является перспективным направлением, прежде всего, благодаря использованию в качестве катализатора нанопорошка  $TiO_2$ . Оксид титана – экологически безопасен, нетоксичен, имеет невысокую стоимость. В

процессе разложения органических загрязнений в присутствии таких катализаторов выделяются экологически безопасные вещества  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и минеральные соли. Однако основной проблемой, связанной с использованием диоксида титана для очистки водной среды, является его способность образовывать суспензию (Рисунок 1А) и со временем оседать на дно. Всё это приводит к снижению эффективности катализатора. В связи с этим возникает необходимость удержания фотокатализатора  $\text{TiO}_2$  на поверхности воды. Одним из способов решения этой проблемы является внедрение частиц  $\text{TiO}_2$  в полимерную матрицу<sup>[1]</sup>.

Существуют исследования, в которых в качестве полимерной матрицы использовались полипропилен, полистирол, полианилин, поливинилхлорид и некоторые другие полимеры [1,2]. Основная часть полимерных композитов (ПК) была синтезирована методом смешения  $\text{TiO}_2$  с раствором или расплавом полимера. В работе [3] полимерный композит полипиррол/ $\text{TiO}_2$  был получен полимеризацией *in situ*. Полимеризацию проводили в растворе 1.5 М  $\text{HCl}$  в присутствии катализатора  $\text{FeCl}_3$  при  $0^\circ\text{C}$  в течение 10 часов. Высокая концентрация  $\text{HCl}$  может приводить к разрушению  $\text{TiO}_2$ , и, кроме того, данный метод приводит к неоднородному распределению наполнителя в полимерной матрице.

В целях избежания данных процессов нами было предложено синтезировать катализатор на поверхности частиц фотокатализатора  $\text{TiO}_2$ , и формировать ПК методом полимеризации этилена *in situ*.

Титан-магниевоый катализатор полимеризации этилена (ТМК) получали последовательным нанесением магний-алюминиевого комплекса (МАК)  $\text{MgBu}_2 \cdot 0.125\text{AlEt}_3$  и  $\text{TiCl}_4$  на предварительно дегидроксилированный при  $450^\circ\text{C}$  фотокатализатор  $\text{TiO}_2$  Aeroxide P25. С использованием ТМК были получены ПК полимеризацией этилена *in situ*, с содержанием полиэтилена 56.9 и 85.4 вес.%.

ПК состоят из аморфных частиц, образованных из более мелких слипшихся между собой полимерных частиц (Рисунок 2).

Полученные ПК проверили на плавучесть в водной среде. Было показано, что в течение 34 дней не происходило их оседания (Рисунок 1Б и 1С).

Известно [1], активность фотокаталитического процесса разложения органических загрязнений с использованием ПК зависит от содержания полимера и доступности фотокатализатора для органических соединений. Основной характеристикой активности является ширина запрещённой зоны полупроводникового катализатора ( $E_g$ ). Для полученных ПК была измерена ширина запрещённой зоны (Таблица 1).

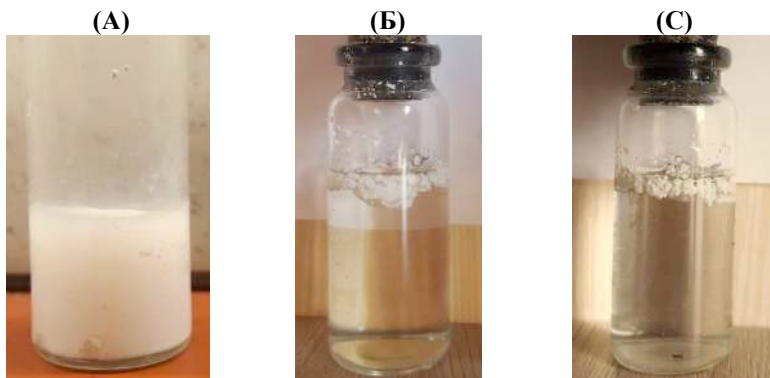


Рис.1 – Фотографии (А) водной суспензии  $\text{TiO}_2$ ; (Б) Композитного фотокатализатора (с содержанием ПЭ 56.9%) сразу после добавления композита в воду и (С) через 34 дня

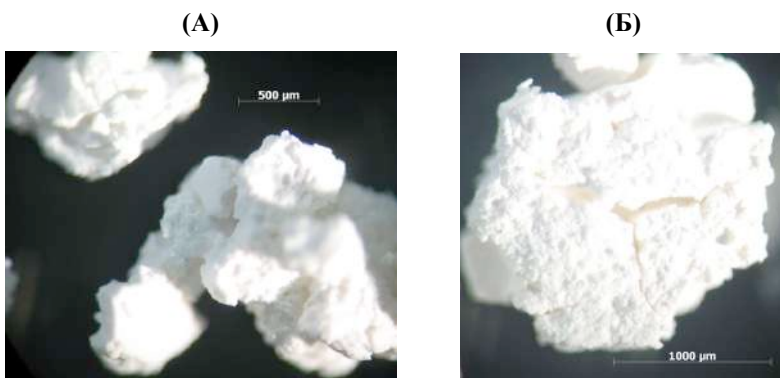


Рис. 2 – Микрофотографии ПК, содержащих (А) 56.9 и (Б) 85.4 вес.% ПЭ

**Таблица 1 – Ширина запрещённой зоны в исходных образцах  $\text{TiO}_2$  и полимерных композитах ПЭ/ $\text{TiO}_2$**

№	ПЭ в ПК, вес. %	$E_g$ , эВ
1	0	3.00
2	56.9	3.00
3	85.4	3.07

Было показано, что  $E_g$  композита, содержащего 56.9 вес.% ПЭ, близка к  $E_g$  исходного фотокатализатора  $TiO_2$ . При большем содержании ПЭ (85.4 вес.%) величина  $E_g$  возрастает, что косвенно может указывать на снижение фотокаталитической активности ПК(85.4%).

Эти данные показывают, что оптимальными катализаторами могут быть ПК с содержанием ПЭ не более 60 вес.%.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект № АААА-А21-121011490008-3)

#### Литература

1 Nasir A.M., Jaafar J., Aziz F., Yusof N., Salleh W.N.W., F.A. Ismail, Aziz M. A review on floating nanocomposite photocatalyst: Fabrication and applications for wastewater treatment // Journal of Water Process Engineering.– 2020.– Vol. 36.– P. 101300.

2. Srikanth B. Recent advancements in supporting materials for immobilised photocatalytic applications in waste water treatment / // Journal of Environmental Management. – 2017. – Vol. 200. – P. 60-78.

3. Wang D., Wang Y., Li X., Luo Q., An J., Yue J. Sunlight photocatalytic activity of polypyrrole– $TiO_2$  nanocomposites prepared by ‘in situ’ method // Catalysis Communications.– 2008.– Vol. 9.– P. 1162–1166.

## РАЗРАБОТКА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПЕНОПОЛИУРЕТАНА И АНТИПИРЕНА

**В.Ю. Ткач**<sup>1,2</sup>, **Ф.К. Горбунов**<sup>1,2</sup>, **А.А. Фадина**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела и механохимии

Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20  
e-mail: f.gorbunov@solid.nsc.ru

*Предложены способы улучшения огнестойкости композиционных материалов на основе пенополиуретанов (ППУ) путем введения «in situ» антипиренового модификатора. Определены оптимальные составы и способы введения модифицирующих добавок в полимерную матрицу.*

*В результате микроструктурных исследований образцов ППУ определено, что введение антипирена в малых количествах (1 масс.% и менее) в полиуретан*

приводит к уменьшению размера его пор и увеличению их количества практически в 5 раз. Модифицированный ППУ имеет открыто-ячеистую перфорированную структуру.

*Methods of improving the fire resistance of composite materials based on polyurethane foams (PUF) by introducing an «in situ» modifier reducing flammability are proposed. Optimal compositions and methods of introducing modifying additives into the polymer matrix have been determined.*

*As a result of microstructural studies of PUF samples, it was determined that the introduction of flame retardants in small quantities (1 wt.% or less) in polyurethane leads to a decrease in the size of its pores and an increase in their number by almost 5 times. The modified PUF has an open-cellular perforated structure.*

Пенополиуретан нашел широкое применение в самых разных отраслях промышленности, таких как автомобильная, легкая, авиаракетно-космическая, строительная и т.д. Горючесть является одним из главных критериев при выборе полимерных материалов [1, 2]. Поэтому перспективным направлением в области разработок новых составов ППУ является изучение и улучшение их огнестойких свойств. При этом разработка композиций антипиренов и методик их введение в полимерную матрицу является актуальной задачей, так как составы антипиренов способные повлиять на развитие горения, воспламеняемость, тление, распространение пламени путем вступления в химическую реакцию непосредственно при воздействии высоких температур чаще всего являются многокомпонентными и/или сложно-синтезированными.

Образцы на основе пенополиуретана получили путем свободного вспенивания по технологической схеме, описанной в работе [3]. Внешний вид полученных образцов представлен на рисунке 1.

В качестве модифицирующей добавки применяли антипирен в количестве 0,5 и 1 масс.%.

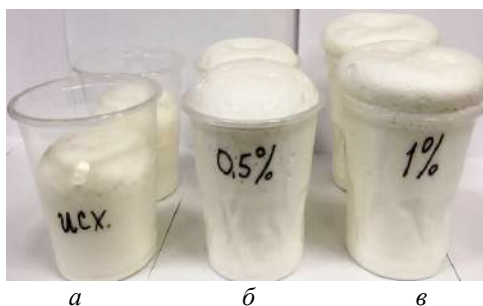


Рис. 1 – Внешний вид образцов на основе ППУ и антипирена (масс.%): а – 0; б – 0,5; в – 1.

Установлено, что введение антипирена в количестве до 1 масс.% приводит к увеличению объема образца до 2х раз в результате свободного вспенивания. При этом происходит изменение внутренней структуры ППУ (рис. 2).

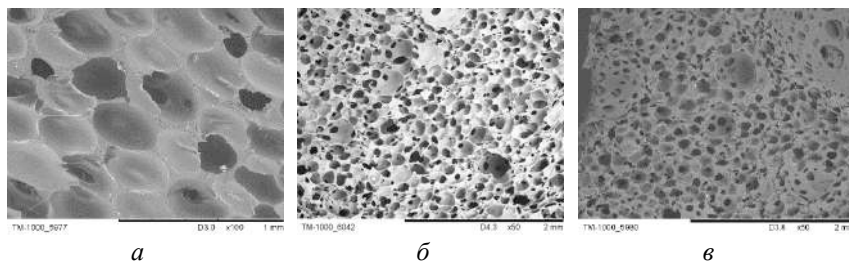


Рис. 2 – Микрофотографии образцов на основе ППУ и антипирена (масс.%): *a* – 0; *б* – 0,5; *в* – 1.

Анализ данных рисунков показал, что модификатор влияет на порообразование в результате химической реакции при взаимодействии компонентов ППУ, происходит изменение структура полимера, его химических и физико-механических свойств. Модифицированный ППУ имеет открыто-ячеистую перфорированную структуру, у которого толщина стенок пор значительно меньше, чем у исходного.

Модификатор вводится «in situ» на стадии смешения компонентов и в ходе синтеза встраивается в структуру полимера, тем самым равномерно распределяется во всем объеме материала. Далее проводили исследование огнестойкости образцов с применением газовой горелки (рис. 3).



Рис. 3 – Испытание модифицированных ППУ на огнестойкость



Введение модификатора до 1 масс. % приводит к само-затуханию материала при выносе его из пламени горелки в результате выделения негорючих газов. Максимальное время горения ППУ, модифицированного антипиреном в количестве до 1 масс.%, составляет 3 с (табл. 1). Последующее увеличение концентрации антипиренового модификатора более 1 масс.% приводит не к снижению, а к увеличению времени горения полимерных образцов. Это связано с предельной концентрацией растворимости модификатора в полимерной матрице. При содержании модификатора более 1,5 масс.% не происходит его полного растворения в объеме компонентов ППУ, что приводит к увеличению горючести образцов.

**Таблица 1- Характеристики образцов на основе ППУ**

№	Содержание модификатора, масс.%	Время остаточного горения образца**, сек	Масса		Уменьшение массы, %
			до возд-я пламени	после возд-я пламени	
1	-	до 400	m=101.9г	-	100%
2	0,5	≈ 3	m=101.3г	97.0г	4.2%
3	1	≈ 2	m=103.2г	97.4г	5.6%

\* - время воздействия пламени горелки составило 30 с;

\*\* - после выноса из пламени горелки.

В ходе проведения испытаний была установлена прямая зависимость влияния концентрации модифицирующего наполнителя на огнестойкие свойства полимера. У образцов с концентрацией 1 масс.% и менее после 30 секунд воздействия пламени горелки наблюдалось затухание в течение 1-4 секунд, самостоятельное горение и дальнейшее распространение пламени по остальному объему образца отсутствовало. При горении под воздействием пламени горелки образовывался не горючий расплав полимера, не способствующий распространению пламени на соседние объекты.

В результате испытания на горючесть исходный образец пенополиуретана после выноса из пламени горелки продолжил интенсивно гореть с выделением большого количества тепла и копоти до полного сгорания. При горении образовывался горящий расплав, способствующий распространению пламени на соседние объекты (рис. 4).



Рис. 4 – Испытание исходного ПТУ на огнестойкость

Литература:

1. Щеглов П.П., Иванников В.Л. Пожароопасность полимерных материалов – М., 1992. – 110 с.
2. Колодов В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов – М., 1976. – 160 с.
3. Полуобояров В.А., Горбунов Ф.К., Волоскова Е.В. Модификация нанодисперсиями каучукообразных полимеров / LAP Lambert Academic Publishing. – 2014. – 131 с

## СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ФЕНОЛА В СТОЧНЫХ ВОДАХ

К.В. Трегубова<sup>1</sup>, Н.В. Громов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет

<sup>2</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН

г. Новосибирск, [karitregubova@yandex.ru](mailto:karitregubova@yandex.ru)

*В работы проведен анализ современных методов по очистке фенол содержащих сточных вод. Показано существование биологических, химических, физико-химических подходов. Для современной промышленности наиболее перспективным представляется физико-химический каталитический подход, имеющий преимущества по сравнению с другими методами, в том числе экономическую эффективность и экологическую безопасность. Вместе с тем применение катализаторов в очистке сточных вод от фенолов сталкивается с рядом проблем, ограничивающих их применение. Таким образом, поиск эффективных катализаторов и условий применения для очистки сточных вод*

*от органических загрязнителей, в том числе фенолов, остается на сегодняшний день актуальной фундаментальной научной задачей.*

*The analysis of modern methods for the purification of phenolic wastewater is carried out in the work. The existence of biological, chemical, physical-chemical approaches is shown. For modern industry, the most promising is the physical and chemical catalytic approach, which has advantages over other methods, including cost-effectiveness and environmental safety. However, the use of catalysts in the purification of wastewater from phenols faces a number of problems that limit their use. Thus, the search for effective catalysts and conditions of application for wastewater treatment from organic pollutants, including phenols, remains an urgent fundamental scientific task for today.*

В настоящее время все больше ощущается необходимость разработки и внедрения подходящих технологий очистки промышленных сточных вод, нацеленных на удаление опасных компонентов. Эта проблема находится в центре внимания из-за повышения экологической сознательности, ужесточения экологической политики и все более строгих требований к эффективности очистки сточных вод [1].

Одним из высокотоксичных загрязнителей, попадающих в водоемы и водотоки со сточными водами различных предприятий, является фенол. В поверхностных водах фенолы встречаются в растворенном состоянии в виде фенолятов, фенолят-ионов и свободных фенолов, которые в свою очередь могут вступать в реакции конденсации и полимеризации, образуя сложные и довольно устойчивые соединения различной степени токсичности. Сброс фенольных вод в водоемы и водотоки резко ухудшает их общее санитарное состояние, оказывая влияние на живые организмы не только своей токсичностью, но и значительным изменением режима биогенных элементов и растворенных газов (кислорода, углекислого газа) [2].

Целью работы являлось проведение анализа мероприятий по снижению концентрации фенола в воде.

Анализ литературы показал, что в настоящее время существует несколько методов очистки сточных вод от фенольных соединений. Их можно разделить на механические, биологические, термические, химические и физико-химические. Применение того или иного метода в каждом конкретном случае определяется характером загрязнения и степенью вредности примесей.

Так, в работе [3] был использован физико-химический подход на основе процессов Фентона и фото-Фентона для очистки сточных вод нефтеперерабатывающей промышленности, содержащих фенольные соединения. Общее содержание фенолов было снижено практически до нуля.

Исследуется также и применение биологических подходов к удалению фенола. С помощью растения эйхорнии, фенол окисляется и усваивается растением как питание. Роль окислителя при этом исполняет кислород [4].

Метод каталитического окисления токсичных веществ считается весьма перспективным и эффективным для очистки сточных вод. Существует два метода глубокого каталитического окисления органических субстратов – это методы глубоко аэробного и пероксидного окисления. Так, применение угольной золы в сочетании с ультразвуковой обработкой делает возможным удаление фенола путем его окисления  $H_2O_2$  или  $O_3$  [5].

В работе [6] для очистки фенол-формальдегидных сточных вод было использовано каталитическое окисление озоном. В качестве катализатора был использован оксид железа  $Fe_2O_3$ , нанесенный на  $\gamma$ -оксид алюминия. В результате озонирования химическое потребление кислорода (ХПК), характеризующее содержание органических веществ в воде, снизилось с 240 до 83 мг/л при дозе озона 1,54 мг/мг ХПК. При использовании цеолитных катализаторов обеззараживание сточных вод озонированием ускоряется в 3-4 раза. Однако необходимо отметить, что использование аэробного окисления более предпочтительно благодаря большей безопасности для окружающей среды и человека. В работе [7] показана возможность применения гомогенных катализаторов (соли и комплексы переходных металлов). Основной проблемой практического использования гомогенных каталитических систем является необходимость отделения катализатора от очищаемого раствора и его регенерация. Последние два десятилетия в мире интенсивно развивались исследования гетерогенных каталитических систем, позволяющих осуществить глубокое каталитическое аэробное окисление органических и неорганических загрязнителей в водной среде. Применение гетерогенных каталитических систем позволяет решить проблемы, возникающие при использовании гомогенных катализаторов.

По своей природе гетерогенные катализаторы для процесса окисления кислородом можно разделить на две основные группы:

1) оксидные катализаторы на основе переходных металлов (Fe, Cu, Mn, Co, Ni) в форме оксидов и смешанных оксидов [8];

2) благородные металлы (Pt, Ru, Pd, Au и др.), закрепленные на стабильных в водной среде оксидных ( $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $CeO_2$ ) и углеродных носителях [8].

Однако, существует ряд важных факторов, ограничивающих применение твердых катализаторов в обсуждаемом процессе:

во-первых, выщелачивание активного компонента катализатора в реакционный раствор;

во-вторых, возможное отравление активных центров катализатора;

в-третьих, закоксовывание поверхности катализатора продуктами окислительной полимеризации.

Указанные проблемы приходится решать в каждом конкретном случае, подбирая различные катализаторы и условия осуществления процессов.

Анализ литературных источников показывает, что с точки зрения экономической эффективности и экологической безопасности наиболее перспективным подходом утилизации органических загрязнителей сточных вод, в частности, фенольных соединений, является каталитический метод окисления кислородом или пероксидом водорода. Однако применение катализаторов по-прежнему сталкивается с рядом проблем, что делает поиск эффективных составов катализаторов и условий их применения для очистки сточных вод от фенолов актуальной фундаментальной научной задачей.

#### Литература:

1. Abdelwahab O., Amin N.K. Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater // *J. Hazard. Mater.* – 2009. – Vol. 163. – P. 711–716.

2. Трубникова Л.А. Органические токсиканты в активном иле предприятий нефтехимии // *Экология и пром. России.* – 1999. – № 4. – С. 40–43.

3. Hernandez-Francisco E., Jose Peral Removal of phenolic compounds from oil refinery wastewater by electrocoagulation and Fenton/photo-Fenton processes // *Journal of Water Process Engineering.* – 2017. – Vol. 19. – P. 96–100.

4. Коростелева А. В. Способ очистки сточных вод от фенолов // *Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского.* – 2011. – № 25. – С. 585–589.

5. Liua H., Lianga M. Y. Catalytic degradation of phenol in sonolysis by coal ash and  $H_2O_2/O_3$  // *Chemical Engineering Journal.* – 2009. – Vol. 153. – P. 131–137.

6. Катализаторы для процесса окисления в водной среде / А.М. Фаттахова, Ю.Ф. Абдрахманова, А.Г. Кирсанова, Р.И. Хангильдин, В.А. Мартяшева, Г.М. Шарафутдинова // *Башкирский химический журнал.* – 2010. – Т. 17, № 5. – С. 16–20.

7. Luck F. Wet air oxidation: past, present and future // *Catalysis Today.* – 1999. – Vol. 53, N 1. – P. 81–91.

8. Wet oxidation and catalytic wet oxidation / S.K. Bhargava, J. Tardio, J. Prasad, K. Föger // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2006. – Vol. 45, N 4. – P. 1221–1258.

# ПОЛУЧЕНИЕ МУРАВЬИНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ПРИСУТСТВИИ ВАНАДИЙ СОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРОВ В ОДНОСТАДИЙНОМ «ONE-POT» ПРОЦЕССЕ

И.А. Черенков<sup>1</sup>, Т.Б. Медведева<sup>2</sup>, Н.В. Громов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, г.Новосибирск, [cherenkov922@gmail.com](mailto:cherenkov922@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г.Новосибирск, [gromov@catalysis.ru](mailto:gromov@catalysis.ru)

*В работе представлены результаты исследования процесса гидролиза-окисления в муравьиную кислоту шелухи овса, представляющей собой сельскохозяйственный растительный отход. Проведено сравнение растворимых и твердых каталитических систем на основе ГПК (катализаторов "зеленой" химии) состава  $H_{11}PMO_4V_8O_{40}$  (ГПК-8) и  $Cs_{3.5}H_{7.5}PMo_4V_8O_{40}$  (ГПК-8). Проведена оптимизация условий протекания процесса для повышения его эффективности.*

*The paper presents the results of a study of the process of hydrolysis-oxidation into formic acid of oat husk, which is an agricultural plant waste. A comparison is made of soluble and solid catalytic systems based on HPA (green chemistry catalysts) with the composition  $H_{11}PMO_4V_8O_{40}$  (HPA-8) and  $Cs_{3.5}H_{7.5}PMo_4V_8O_{40}$  (HPA-8). Optimization of the process conditions has been carried out to increase its efficiency.*

В настоящее время широкое применение ископаемого углеводородного сырья для получения энергии оказывает негативное влияние на окружающую среду. Добыча и переработка такого вида топлива ведёт к значительной эмиссии углекислого газа в атмосферу, которая вызывает большое количество экологических проблем. Для снижения нагрузки на окружающую среду и снижения углеродного следа применяемых технологий, необходим поиск новых экологических методов получения, хранения и транспортировки энергии.

В этой связи водород и водородная энергетика представляются новым перспективным способом решения вызовов в области экологии, рационального природопользования и техносферной безопасности. К преимуществам  $H_2$  можно отнести его экологическую чистоту, а также возможность его получения из возобновляемых ресурсов, в том числе растительной биомассы.

Однако, при использовании водорода возникают проблемы, связанные с его транспортировкой и хранением, которые в свою очередь вызваны высокими требованиями к безопасности [1]. Рациональным представляется использование для решения задач

логистики химических веществ - доноров водорода, из которых  $H_2$  может быть получен при необходимости.

Одним из наиболее перспективных доноров водорода выступает муравьиная кислота (МК). В настоящее время это соединение применяется во многих отраслях промышленности (химическая, текстильная, сельскохозяйственная и др.). Из одного литра МК можно извлечь 53 грамма водорода [2]. МК также рассматривается как перспективный заменитель водорода в процессах восстановления. В настоящее время промышленным способом получения МК является реакция монооксида углерода с гидроксидом натрия, который осуществляется в две стадии с применением серной кислоты [3]. Такой способ выделения МК также отличается низкой экологичностью. Например, серная кислота обладает токсическим действием и коррозионными свойствами.

В настоящее время предложен способ получения МК из растительной биомассы, в основе которого лежит процесс гидролиза-окисления субстрата до МК в присутствии катализаторов на основе гетерополикислот (ГПК) [4]. Получаемая таким образом МК называется биогенной, а сам способ ее получения – «OxFA-процесс». Гидролиз-окисление растительного сырья протекает в кислородной или воздушной среде, в воде в качестве экологически безопасного растворителя. В результате этого экологически чистого процесса получается МК, в качестве основного жидкого продукта. ГПК входят в список катализаторов «зелёной» химии и могут иметь различный состав. В процессе могут быть использованы как гомогенные, так и гетерогенные ГПК.

В настоящее время активно появляются новые исследования в области оптимизации «OxFA» процесса для получения наиболее высоких выходов и селективности МК. Исследуются различного рода субстраты, оптимизируются условия протекания реакции, а также исследуется влияние состава катализатора на селективность процесса.

В качестве субстратов для «OxFA» процесса могут использоваться: небольшие органически молекулы (моносахариды, сорбитол и др.), полимерные компоненты лигноцеллюлозной биомассы (целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин) и растительная биомасса недревесного (шелуха овса и др.) и древесного типа (кора осины и др.). Более предпочтительна биомасса недревесного типа, т.к. она не создаёт дополнительную нагрузку на лесные массивы и не вступает в конфликт с выращиванием пищевых продуктов.

В данной работе будет представлено сравнение эффективности растворимых и твердых каталитических систем на примере ГПК состава

$H_{11}PMO_4V_8O_{40}$  (ГПК-8) и  $Cs_{3,5}H_{7,5}PMO_4V_8O_{40}$  (ГПК-8) в гидролизе-окислении таких субстратов как: чистая целлюлоза, целлюлоза, выделенная из шелухи овса - перспективного для переработки в Сибири сельскохозяйственного отхода. В присутствии лучшей каталитической системы проведен поиск оптимальных условий реакции для наибольшей эффективности процесса.

Литература:

1. Edwards P., Kuznetsov V., David B. Hydrogen energy // Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. – 2007. – Т. 365. – С. 1043-56.

2. Valentini F., Kozell V., Petrucci C., Marrocchi A., Gu Y., Gelman D., Vaccaro L. Formic acid, a biomass-derived source of energy and hydrogen for biomass upgrading // Energy & Environmental Science. – 2019. – Т. 12, № 9. – С. 2646-2664.

3. Кнунянц И.Л., Химическая энциклопедия: Мед - пол. / Кнунянц И. Л., Зефилов Н. С.: Советская энциклопедия, 1992. – Т. 3.

4. Wölfel R., Taccardi N., Bösmann A., Wasserscheid P. Selective catalytic conversion of biobased carbohydrates to formic acid using molecular oxygen // Green Chemistry. – 2011. – Т. 13, № 10. – С. 2759-2763.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ СИНТЕЗА «PLATFORM MOLECULES»**

**К.С. Черепанова<sup>1</sup>, Н.В. Громов<sup>1,2</sup>, Т.Б. Медведева<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>ИК СО РАН им. Г.К. Бореского, г. Новосибирск,  
**cherepanovax1@gmail.com, gromov@catalysis.ru**

*В работе проведено исследование состава и определены условия осуществления делигнификации шелухи овса - перспективного в Западной Сибири источника сырья для получения фурановых производных как биотоплив и/или октанповышающих добавок.*

*In the course of the work carried out, the composition was studied and the conditions for the delignification of oat husks, which are a promising source of raw materials in Western Siberia for obtaining furan derivatives as biofuel and / or octane-increasing additives, were determined.*



Постепенное истощение высококачественных и легкодоступных запасов ископаемого топлива является причиной валоризации нефтепродуктов и нестабильности мирового энергетического рынка. Также потребление нефти, газа, угля, горючих сланцев представляется серьезным экологическим вызовом, поскольку эксплуатация ископаемых ресурсов наносит серьезный ущерб окружающей среде, в том числе изменение ландшафта и климата, разливы нефтепродуктов при транспортировке и добыче. Существенной проблемой становится углеродный след, вызванный переработкой ископаемого углеводородного сырья.

Перспективным способом решения экологических проблем является развитие способов получения и применения так называемых "молекул-платформ" (от англ. platform molecules) - ценные соединения с высоким потенциалом использования в химической, ракетно-космической, сельскохозяйственной, пищевой, кожевенной и многих других отраслях промышленности. К преимуществам «молекул-платформ» можно отнести возможность их получения при переработке возобновляемой растительной биомассы. Среди перспективных соединений, которые можно получать из растительного сырья, следует особо отметить фурановые производные, которые могут использоваться в качестве экологически чистого топлива или экологически безопасных высокооктановых добавок.

При выборе растительного сырья для получения фурановых соединений необходимо учитывать несколько важных критериев, в частности, лигноцеллюлозная биомасса должна быть непригодной для питания, легкодоступной, производиться в достаточно большом объеме. Для западносибирского региона в качестве перспективного субстрата для переработки в ценные химические продукты можно выделить отход сельского хозяйства – шелуху овса. Алтайский, Красноярский края и Новосибирская область – лидеры по сбору овса в России [1]. Так, в 2018 г. было собрано 1 348 тыс. тонн овса [1], что составляет ~240 тыс. тонн/год шелухи [2]. В настоящее время отходы после шелушения зерна практически не перерабатываются и складываются на отвалах.

На сегодняшний день опубликован ряд работ по каталитической переработке и предобработке растительного сырья в фурановые соединения [3-5].

В ходе выполнения данной работы изучен состав шелухи овса и проведены исследования по предварительной переработке растительного сырья с целью выделения основных компонентов лигноцеллюлозной биомассы, пригодных для получения фурановых производных и других ценных химических продуктов.

В ходе выполненной работы определены такие ключевые для переработки растительной биомассы параметры как влажность, зольность, содержание экстрактивных веществ, целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина. Исследования проведены на примере шелухи, полученной на Новокузнецком мелькомбинате. Для подготовки шелухи овса для анализа субстрат был промыт горячей водой 5-7 раз и высушен до постоянной массы на воздухе.

Содержание лигнинов определено по методике с использованием 72%-ной серной кислоты в модификации Комарова [6]. Метод определения доли золы в шелухе овса основан на сжигании и прокаливании навески субстрата. Количественное значение смолистых веществ определено с помощью методики экстрагирования спиртобензольной смесью (соотношение спирт/бензол = 2/1) в аппарате Сокслета (рис.1) [6].



Рис.1 – Аппарат ускоренного действия для экстрагирования [6]

Количественное содержание полисахаридных компонентов – гемицеллюлоз и целлюлозы – анализировались следующими способами. Содержание первых определили методом гидролиза с 2%-ой соляной кислотой с последующим анализом выделившихся моносахаридов методом ВЭЖХ. Количество целлюлозы определено по методу Крюшнера в азотно-спиртовой смеси.

Согласно полученным данным, влажность шелухи овса составила 5,5%. Содержание основных компонентов в расчете на сухую массу шелухи было следующим: гемицеллюлозы - 34%, целлюлоза - 44%, лигнин – 22%, зольность – 6% и экстрактивные вещества – 0,8% (рис.2). В составе гемицеллюлоз присутствуют полимеры преимущественно ксиланы (ксилан) с примесями арабинозы, глюкозы, галактозы.

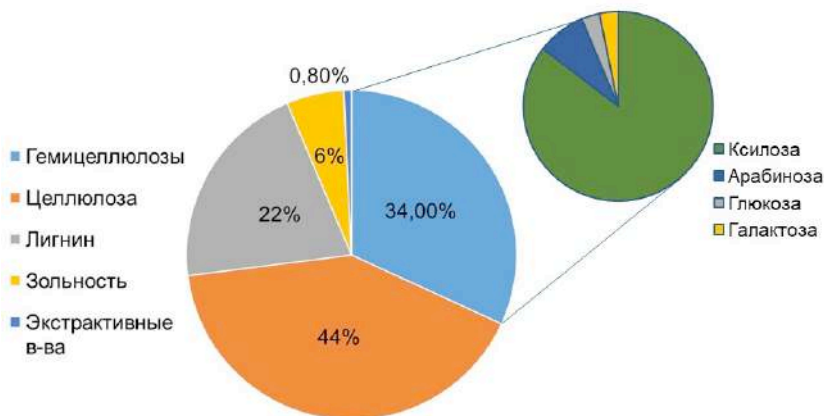


Рис.2 – Соотношение основных структурных составляющих овсяной шелухи

Шелуха овса с определенным составом подвергнута окислительной делигнификации пероксидом водорода для выделения целлюлозы по методике, описанной в работе [7]. Метод был адаптирован для недревесного сырья. В ходе работы подобраны оптимальные условия переработки шелухи овса (соотношение и концентрации кислоты и  $H_2O_2$ , температуры), изучено влияние физической активации шелухи с помощью ножевой мельницы в течении 1 или 15 минут.

#### Литература:

1. Посевные площади, валовые сборы и урожайность овса в России. Итоги 2018 года. – 2019. – URL: <https://ab-centre.ru/news/posevnyie-ploschadi-valovye-sbory-i-urozhaynost-ovsa-v-rossii-itogi-2018-goda>.
2. Переработки зерносмесей овса. – 2019. – URL: <http://hipzmag.com/tehnologii/pererabotka/pererabotki-zernosmesej-ovsa-s-primesyami-goroha-yachmenya-i-pshenitsy/>.
3. Singh R., Shukla A., Tiwari S., Srivastava M. A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Т. 32. – С. 713-728.
4. Wyman C. E., Dale B. E., Elander R. T., Holtzapple M., Ladisch M. R., Lee Y. Y. Comparative sugar recovery data from laboratory scale application of leading pretreatment technologies to corn stover // Bioresour Technol. – 2005. – Т. 96, № 18. – С. 2026-32.

5. Громов Н., Таран О., Сорокина К., Мищенко Т., Утанди Ш., Пармон В. Новые методы одностадийной переработки полисахаридных компонентов лигноцеллюлозной биомассы (целлюлозы и гемицеллюлозы) в ценные продукты. Часть 1. Методы активации биомассы. // Катализ в промышленности. – 2016. – Т. 16(1). – С. 74-83.

6. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. / Оболенская А., Ельницкая З., Леонович А. – Москва: Экология, 1991.

7. Sudakova I. G., Garyntseva N. V., Chudina A. I., Kuznetsov B. N. Experimental and Mathematical Optimization of the Peroxide Delignification of Larch Wood in the Presence of MnSO<sub>4</sub> Catalyst // Catalysis in Industry. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 265-272.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЗАВИСИМОЙ ПЛАТФОРМЫ «CITYAIR» ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

**И.А. Черных, Э.В. Линд**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**i\_cher12@mail.ru, lindelya20@gmail.com**

**Научный руководитель: Е.А. Удалцов, к.в.н., доцент**

*Статья посвящена анализу влияния открытого способа добычи угля на окружающую среду и сравнению данных государственных и независимых источников мониторинга качества атмосферного воздуха. В результате исследования было выявлено несоответствие показателей уровня загрязнения атмосферы Кемеровской области.*

*The article is devoted to the analysis of the impact of open-cut coal mining on the environment and the comparison of data from state and independent sources of atmospheric air quality monitoring. As a result of the study, a mismatch of indicators of the level of pollution in the Kemerovo region was revealed.*

Проблема загрязнения атмосферного воздуха в Кемеровской области одна из наиболее острых экологических проблем, так как основная часть населения проживает в районах, где концентрации загрязняющих веществ регулярно превышают предельно допустимые уровни. Основной причиной такого загрязнения является добыча угля на разрезах и шахтах, преимущественно открытым способом, который характеризуется негативным воздействием на окружающую природную среду [1].

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха на территории области являются предприятия по добыче полезных ископаемых. Взрывы на угольных разрезах, работающие двигатели внутреннего сгорания и безветренная погода в карьерах способствует аккумуляции пыли и смога в окружающей среде.

В 2020 году в Кемеровской области совокупный объем выбросов загрязняющих веществ, различного класса опасности, в атмосферу от стационарных организованных и неорганизованных источников 1745 предприятий составил 1611,8 тыс. т., а от передвижных – 66,5 тыс. тонн. В том числе, из выбросов от стационарных источников 65,2 % – 1050,9 тыс. тонн – это загрязняющие вещества от угледобычи [2].

В Кузнецком угольном бассейне расположено 58 шахт и 36 угольных разрезов, которые специализируются на добыче угля открытым способом. Такой метод добычи угля и его обработка сопровождается негативным воздействием на окружающую среду, которое выражается в нарушении структуры земной поверхности, появлении новообразований в виде отвалов пустой породы, рассеянием по местности угольного бассейна отходов, образующихся при добыче полезных ископаемых.

Одним из приоритетных предприятий I класса опасности по угледобыче является «Караканский угольный разрез», расположенный на территории Беловского района, который в 2019 году занимал 4 место по количеству выбросов в атмосферный воздух региона (106,607 тыс. тонн).

Предприятие имеет 80 источников выброса загрязняющих веществ в атмосферу, из которых 29 организованных и 51 неорганизованных. Количество выбрасываемых вредных веществ в целом по объекту – 36. Общий валовый выброс по предприятию в 2020 году с учетом взрывных работ и горящих отвалов составляет 2138,518664 т/год.

Загрязнителями атмосферы, преимущественно 3 класса опасности, от разреза являются: пыль неорганическая с содержанием кремния 20-70% (847,8 т/г), диоксид азота (213,4 т/г), оксид углерода (251,4 т/г), диоксид серы (97,8 т/г) взвешенные вещества (29,9 т/г), зола твердого топлива (51,2 т/г) [3].

Согласно данным ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» за декабрь 2020 года в городах Новокузнецк, Прокопьевск и во всей Кемеровской области в целом уровень загрязнений оценивается как повышенный [4].

Пост независимого мониторинга качества атмосферного воздуха «CityAir» расположен в городе Новокузнецк. По результатам измерений в декабре 2020 года средний индекс качества воздуха (AQI) равен 9 и характеризуется очень высоким уровнем загрязнения атмосферы [5].

Сравнив данные государственного и независимого источника мониторинга качества атмосферного воздуха на примере анализа состояния атмосферы Кемеровской области за декабрь 2020 года, можно сделать вывод о том, что показатели отличаются на два уровня по количеству загрязнений. Возникают сомнения по поводу точности статистики государственных источников, потому что именно они указывают на снижение уровня загрязнений региона.

В настоящее время мы наблюдаем неоднозначную картину загрязнений и не можем оценить существенный вред, который на самом деле наносит антропогенное воздействие человека на природную среду и на здоровье населения в целом.

#### Литература:

1. *Стрекалов С.В.* Сравнительный анализ влияния открытого и подземного способов добычи угля на экологические и социально-экономические аспекты в угледобывающих регионах // Евразийский союз ученых – 2015. – № 11(20). – С. 112–115.

2. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Кемеровской области – Кузбасса в 2020 году» — Кемерово, 2021.

3. Проект нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) загрязняющих веществ в атмосферный воздух для АО УК «Кузбассразрезуголь» филиал «Моховский угольный разрез» (Караканское поле) Беловский район – Кемерово, 2018.

4. Кемеровский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/323>

5. Платформа мониторинга качества атмосферного воздуха «CityAir» URL: <https://cityair.io/ru/about-project>

# СИНТЕЗ ГЛИЦЕРИНКАРБОНАТА ИЗ ГЛИЦЕРИНА И ДИМЕТИЛКАРБОНАТА В ПРИСУТСТВИИ СИЛЬНООСНОВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Швыдко<sup>1,2</sup>, С.А. Приходько<sup>2</sup>, М.Н. Тимофеева<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт катализа им.Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск,  
alina.schwydcko.98@mail.ru

Научный руководитель: Тимофеева М.Н., д.х.н., доцент

*В работе приведены результаты исследования влияния катализаторов, обладающих различными текстурными и структурными характеристиками, на выход глицеринкарбоната в реакции глицерина с диметилкарбонатом при 90°C и мольном соотношении диметилкарбонат/глицерин, равном 2. Показано, что физико-химические свойства катализаторов влияют на их каталитические свойства.*

*Effect of catalysts with different textural and structural characteristics on the yield of glycerol carbonate in synthesis of glycerol carbonate from glycerol and dimethyl carbonate at 90°C and a molar ratio of dimethyl carbonate/glycerol equal to 2 was investigated. It is shown that the physicochemical properties of catalysts affect their catalytic properties.*

Глицеринкарбонат (4-гидроксиметил-1,3-диоксолан-2-он) широко применяется в качестве растворителя, топливной добавки, а также как промежуточное соединение для синтеза глицидола и др. [1]. Одним из способов его получения является реакция переэтерификации глицерина (I) диметилкарбонатом (II) в присутствии основных катализаторов (NaOCH<sub>3</sub>, аминов и др.) (Рисунок 1).

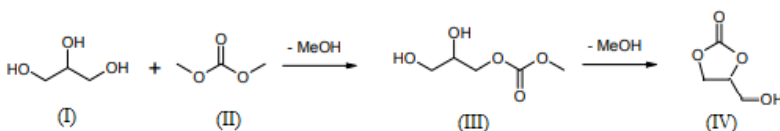


Рис. 1 – Реакция синтеза глицеринкарбоната из глицерина и диметилкарбоната

Целью данной работы было исследование возможности использования в качестве катализаторов данной реакции (а) сильноосновных стирол-дивинилбензолных анионитов Dowex 1×2, Dowex 1×4 и Dowex 1×8 в -ОН форме с разной степенью шивки полистирольной матрицы (содержание дивинилбензола 2, 4 и 8 масс.%), обладающих высокой термостабильностью, (б) цеолитоподобных имидазолятных каркасов MAF-6 и ZIF-8, образованных ионами цинка и

2-этил- и 2-метилимдазолом, соответственно, и (в) композитов на основе ZIF-8 и слоистого титаносиликата АМ-4. Основное внимание при исследовании данных систем было обращено на установление влияния структуры и основности материалов на скорость реакции и селективность глицеринкарбоната (IV).

В работе были использованы глицерин (марки «осч»), диметилкарбонат (Acros Organics, 99 %), метанол (Aldrich), стирол-дивинилбензолные анионообменные смолы Dowex (Dow Chemical) в хлоридной форме. В -ОН форму анионообменные смолы были переведены выдерживанием их в водном растворе гидроксида натрия в течение 24 ч. ZIF-8 и MAF-6 были синтезированы по методикам, приведенных в [2]. Композиты ZIF-8/АМ-4 были получены обработкой АМ-4, в котором определенное количество  $\text{Na}^+$  было замещено на  $\text{Zn}^{2+}$ .

Каталитические свойства выбранных материалов были изучены в реакции синтеза (IV) из (I) и (II) при 90°C. Предварительно образцы анионитов Dowex были высушены при комнатной температуре. Цеолитоподобные имидазолятные каркасы и ZIF-8/АМ-4 композиты перед каждым экспериментом прокаливали при 150°C в течение 2 ч для удаления адсорбированной воды. Реакцию проводили в стеклянном автоклаве, снабжённом мешалкой, при мольном соотношении (II)/(I) 2/1 моль/моль, 0.1 г катализатора в течение 24 ч. В данных условиях аниониты Dowex в Cl-форме были не активны. Основными продуктами реакции были 3-метокси-1,2-пропандиол (III) и (IV). Результаты экспериментов представлены в таблице 1. В присутствии исследуемых систем реакция имела гетерогенный характер, поскольку катализатор визуально представлял собой отдельную фазу и после его отделения реакция не протекала.

**Таблица 1 – Каталитические свойства изученных систем <sup>a</sup>**

Образец	Конверсия (I) (%)	Селективность (%)	
		(III)	(IV)
Dowex 1×2(OH)	91.0	76.9	23.1
Dowex 1×4(OH)	93.2	84.5	15.5
Dowex 1×8(OH)	92.4	93.2	6.8
АМ-4	93.2	31.1	68.9
0.5% ZIF-8/АМ-4	94.8	21.6	78.4
5% ZIF-8/АМ-4	96.9	37.1	62.9
ZIF-8	71.3	99.6	0.4
MAF-6	83.4	46.5	53.5

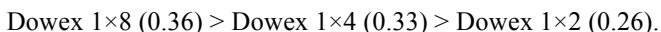
<sup>a</sup> Условия эксперимента: 1.26 г (I), 2.14 г (II) ((II)/(I) 2/1 моль/моль), 0.1 г катализатора, 90°C, 24 ч



Согласно полученным данным в присутствии анионообменной смолы Dowex в -ОН форме конверсия (I) и селективность (IV) зависили от степени сшивки анионита и снижались с её увеличением в ряду (Таблица 1):



что находится в обратной зависимости от порядка изменения количества -ОН групп (моль/г) в образцах:



Очевидно, что на скорость реакции влияет не только количество основных центров, но и их доступность. Чем больше степень сшивки, тем меньше реагентов провозимодействует с активными центрами анионитов. Максимальная конверсия (I) (91.0 %) и селективность (IV) (23.1 %) наблюдались в присутствии Dowex 1×2(OH).

В присутствии MAF-6 селективность (IV) (53.5 %) была выше по сравнению с ZIF-8 (0.4 %) (Таблица 1). Высокую эффективность MAF-6 можно объяснить высокой силой основных центров (870 кДж/моль) по сравнению с ZIF-8 (858 кДж/моль) [2].

В присутствии AM-4 конверсия (I) и селективность (IV) составили 93.2 % и 68.9 %, соответственно. Введение в ZIF-8 в структуру AM-4 в количестве 0.5 % привело к увеличению селективности (IV) до 78.4 %, при этом скорость реакции существенно не изменялась. Однако дальнейшее увеличение содержания ZIF-8 в композите сопровождалось снижением селективности (IV). В присутствии ZIF-8 основным продуктом являлся (III) с селективностью 99.6 %. Уменьшение селективности (IV) можно объяснить снижением силы (для AM-4 и ZIF-8 – 1019 и 858 кДж/моль, соответственно) и количества основных центров с образованием кристаллов ZIF-8 в структуре AM-4.

#### Литература:

1. De Caro P., Bandres M., Urrutigoity M., Cecutti C., Thiebaud-Roux S. Recent progress in synthesis of glycerol carbonate and evaluation of its plasticizing properties // *Front. Chem.* – 2019. – Vol. 7. – P. 1–13.

2. Timofeeva M.N., Lukoyanov I.A., Panchenko V.N., Gerasimov E.Yu., Bhadra B.N., Jhung S.H. Effect of MAF-6 crystal size on its physicochemical and catalytic properties in the cycloaddition of CO<sub>2</sub> to propylene oxide // *Catalysts.* – 2021. – Vol. 11, N 9. – P. 1061–1078.

## МЕТОДЫ АКТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Н.С. Яшутин, И.Ф. Козорез, А.К. Паршукова,**  
д.т.н., профессор **Н.А. Машкин**  
Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, e-mail: yashutin.2016@yandex.ru

*В лабораториях кафедры инженерных проблем экологии НГТУ (Новосибирск), с участием ЮГУ (Ханты-Мансийск) и НГИИ (Норильск) разработаны технологии производства композиционных строительных материалов на основе техногенного сырья с применением активации компонентов. В качестве эффективного активационного оборудования в таких технологиях рекомендуется применять дезинтеграторы и термодиспергаторы. Предложена универсальная технологическая схема активации техногенных компонентов в производстве композиционных строительных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами.*

*In the laboratories of the Department of Environmental Engineering Problems of NSTU (Novosibirsk), with the participation of YUG (Khanty-Mansiysk) and NGII (Norilsk), technologies for the production of composite building materials based on technogenic raw materials using the activation of components have been developed. As an effective activation equipment in such technologies, it is recommended to use disintegrators and thermal dispersants. A universal technological scheme for the activation of technogenic components in the production of composite building materials with improved operational properties is proposed.*

### **Современные представления об активации компонентов в производстве композиционных строительных материалов**

Главным и перспективным направлением в производстве композиционных строительных материалов являются технологии с использованием техногенных сырьевых ресурсов, образующихся практически во всех видах деятельности человека. Наиболее массовыми техногенными отходами и находящимися вблизи производителей строительных материалов, являются золошлаки и отходы переработки горных пород. Они являются наиболее подготовленными к технологиям производства строительных материалов и обладают значительным запасом свободной внутренней энергии, участвующей в процессах структурообразования при получении композиционных материалов с

заданными физико-механическими свойствами [1]. Кроме этого, золошлаки и отходы переработки горных пород находятся в измельченном виде и, практически, имеют сходный средний химический состав, что предопределяет экономическую целесообразность их применения в качестве сырья или добавок для производства минеральных вяжущих или в качестве заполнителей всех уровней. Важной технологической операцией является при этом активирование и модифицирование техногенного сырья с помощью методов механического, электрофизического, электрохимического, механохимического, термического, каталитического воздействий.

Как показывают эксперименты, главными и простыми методами создания наноструктур непосредственно в технологическом процессе производства строительных материалов являются механохимические и электрохимические методы программированного (направленного) воздействия [2].

Механические, электрические и термические воздействия позволяют управлять скоростью образования связующей фазы и размерами ее элементов, независимо от природы материала, а также регулировать скорость движения ультрадисперсных частиц и ионов, влияющих на формирование водотвердых отношений в локальных зонах структур строительных композитов.

Сравнительный анализ физико-химических процессов образования техногенных отходов с процессами естественного образования силикатных пород и процессами формирования искусственных материалов, позволяет сделать выводы:

- в основе строения и термодинамической устойчивости композиционных материалов, лежит физико-химическое сопряжение между их компонентами, химическая часть которого включает в себя кислотно-основное и окислительно-восстановительное взаимодействия;

- процессы набора прочности в щелочных системах зависят от фазового и физико-химического состава заполняющих компонентов, а также от природы и количества щелочного компонента и описываются константой равновесия кислотно-основного и окислительно-восстановительного взаимодействия;

- введение повышенного количества щелочных компонентов в низкоосновные или кислые заполнители ускоряет процессы омоноличивания или позволяет создавать новые виды щелочных гидравлических вяжущих;

- использование механо-, электро-, термоактивации вяжущего с добавками золы и модифицирования двух-, трехвалентными солями металлов позволяет довести содержание золошлаковой составляющей в

вяжущем до 50-60 %, снизить энергозатраты при сохранении характеристик вяжущих.

Таким образом, существует возможность реализации экономичного способа образования композиционных материалов на основе вяжущих и щелочных компонентов, аналогичного природному процессу образования горных пород. Мы видим решение поставленной задачи в создании технологий композиционных строительных материалов на основе техногенного сырья с применением механоактивации и электрохимической обработки сырья [2].

### **Универсальная технологическая схема производства композиционных строительных материалов**

Предлагается универсальный технологический процесс, оснащенный оригинальным комплектом основного технологического оборудования для осуществления сухой механоактивации и механо-, электро-, термоактивации с одновременной диспергацией в жидкой среде и комплектом оборудования для программированной электрохимической обработки.

По этой же универсальной схеме также возможно приготовление минеральных порошков заданного гранулометрического состава, сухих строительных смесей с заданными свойствами и различной рецептуры. Предлагаемая схема снабжается комплексом программированной электрохимической обработки **ТДА-М** с целью управления процессами активирования, модифицирования и структурообразования при создании композиционных строительных материалов (рис. 1). В технологии могут использоваться установки для совместного сухого помола всех компонентов вяжущего и мокрого помола основного наполнителя. В качестве основного наполнителя могут быть использованы песок, сухая зола уноса ТЭЦ и т.п.

Технологический процесс позволяет производить минеральные вяжущие материалы из первичных сырьевых ресурсов, а именно активированные золо- или песчано-цементные, золо- или песчано-известковые вяжущие материалы специального назначения, а также приготовленные на их основе соответствующие цементные растворы, пено- и газо-бетоны [3, 4].

Для производства неавтоклавных пенобетонов и газобетонов, кроме перечисленного оригинального оборудования технологическая линия производства пенобетона включает стандартное технологическое оборудование и отвечает по производственным показателям требованиям, представленным в табл. 1.

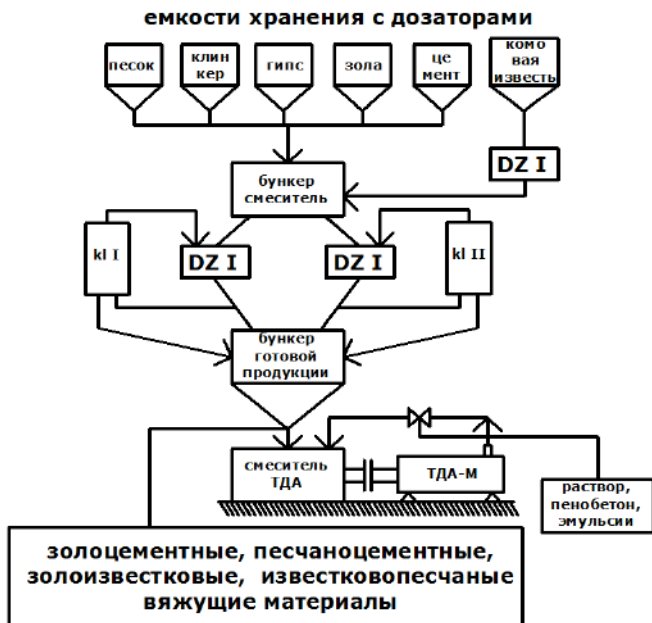


Рис. 1 - Универсальная технологическая схема, включающая: дезинтегратор - **DZ**, классификаторы - **к I** и **к II**, термоактиватор-диспергатор - **TDA**, комплекс оборудования для электрохимической обработки - **TDA-M**

**Таблица 1 – Ориентировочные параметры производства пенобетона**

Средняя плотность	кг/м <sup>3</sup>	700÷800
Прочность на сжатии	кг/м <sup>2</sup>	20÷35
Теплопроводность	Вт/(м·град)	0,16÷0,18
Морозостойкость	цикл	не менее 25
Усадка при высыхании	мм/м	не более 3
Установочная мощность	кВт	60
Цемент		ЦЕМ 1, 42,5
Производительность	м <sup>3</sup> /час	6
Масса оборудования	т	6
Габаритные размеры мобильной установки	м	2×6×4,2

Предлагается установка активации водоцементных смесей, песчаной, песчано-зольной смесей и известкового молока, а также других эмульсий суспензий.

### Характеристики активационного оборудования

В таблице 2 приведены сравнительные характеристики различных устройств для измельчения, диспергации и активации.

**Таблица 2. Сравнительные технические характеристики различных устройств для сухого и мокрого измельчения (активирования)**

Оборудование	Производительность (по сухому цементу), т/ч	Установленная мощность, кВт	Расход энергии на 1т сухого цемента, кВт/час	Удельная металлоёмкость, т.ч./т	Увеличение прочности бетона, %	
					На изгиб	На сжатие
1. Струйная мельница	0,33 0,6-1,2	10 14	20 10,9	4,3 3,8	17 19	33 35
2. Виброактиватор	0,1-0,3 2,5-5,0	10 7,5	35 1,4	2,5 -	8 14	20 30
3. Вибросмеситель	2,5-4,0	50	15	-	12	28
4. Ультразвуковой активизатор	0,7-1,0	16	19	1,4	15	27
5. Акустический активизатор	2,5-3,5	29	6,8	-	13	25
6. Электрогидравлический активизатор	2,5	20	5,6	-	11	24
7. Турбулентный смеситель-активизатор	<b>2,2</b> <b>5,0</b>	<b>28</b> <b>4,5</b>	<b>8,9</b> <b>0,63</b>	<b>0,9</b> <b>0,12</b>	<b>16</b> <b>15</b>	<b>30</b> <b>32</b>
8. Струйный смеситель-активизатор						
9. Термодиспергатор - активатор ТДА						
10. Дезинтегратор - активатор						

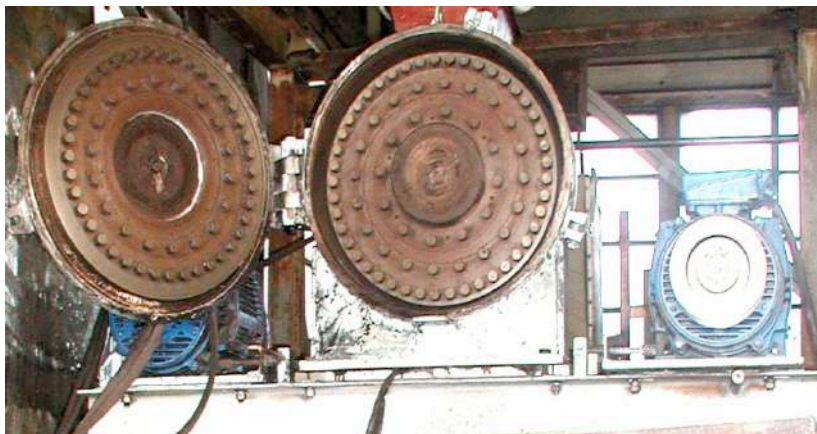


Рис. 2 - Промышленные дезинтеграторы  
производительностью 6т/час



Рис.3 - Термодиспергатор -TDA

Основные технологические характеристики термодиспергаторов – TDA.

Производительность: по жидкой эмульсии, м<sup>3</sup>/час – 0,1 ÷ 100;  
по обработанной суспензии (пенобетоны, растворы), т/ч – 0,1 ÷ 3.  
Удельные энергетические затраты: по битумной эмульсии, кВт·ч/ м<sup>3</sup>  
– 3,75;  
по обработанной смеси с дополнительным измельчением, кВт·час/т.  
–15;  
без дополнительного измельчения, квт/т·ч – 3 ÷ 4.

### **Заключение**

Активирование компонентов строительных смесей в технологии композиционных строительных материалов позволяет эффективно использовать в качестве сырья техногенные отходы. При этом обеспечивается повышение эксплуатационных характеристик таких материалов. Предложена универсальная технологическая схема активирования материалов, комплект активационного оборудования в технологии композиционных строительных материалов на основе техногенного сырья.

### **Литература**

1. Baev V. S. Scientific Development in the field of Modern Building Materials and Technologies/V. S. Baev, N. A. Maschkin, V. M. Hrulev//The Second International Forum on Strategic Technology, Ulanbator, Mongolia, Oct. 2007.
2. Баев В.С., Машкин Н.А. Принципы механической активации основных компонентов строительных материалов. Междунар. сб. науч. тр. НГАУ, Новосибирск. 2007. С.223-226.
3. Elesin M., Studies of Heat Insulation Concrete / M. Elesin, N.A. Mashkin, E.A. Bartenjeva, V. Larichkin, M. Nikolaeva // «FarEastCon - Materials and Construction II» Materials Science Forum Vol. 992, 2020, s. 130-134
4. Федченко В.И., Машкин Н.А., Баев В.С. Архитектурно-строительная система "АБВ стройтехнологии" / Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 8 (680). С. 118.



## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АВИАРАКЕТОСТРОЕНИЯ

#### Секция ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

#### Секция КОНСТРУКЦИЯ И ДЕЙСТВИЕ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ И БОЕПРИПАСОВ

Родина А.В., Калаев М.П.	Самара	3
Замятин Д.А.	Красноярск	5
Мешков А.А.	Новосибирск	9
Хохлова А.Ю.	Москва	13
Карпович Е.А.	Москва	17
Шилин П.Д.	Тула	20
Матвеев Д.А.	Новосибирск	24

#### Секция ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН

Артемьев А.Е.	Новосибирск	27
Ковальчук Л.М.	Новосибирск	31
Литенко П.А.	Новосибирск	35
Михайлова О.А., Николаева Е.Д.	Новосибирск	40
Мосиенко Д.С.	Новосибирск	44
Некрасова Д.А.	Новосибирск	50
Немировский Ю.В.	Новосибирск	53
Почтаренко Р.А.	Новосибирск	58
Решетников Д.Е.	Новосибирск	63
Романенко Е.И.	Новосибирск	66
Селиванов Ю.С.	Новосибирск	70
Толстов М.А.	Новосибирск	74
Томшин В.М.	Новосибирск	79
Шелевая Д.Р.	Новосибирск	83
Щедренко С.Р.	Новосибирск	89

**Секция АЭРОДИНАМИКА И АЭРОУПРУГОСТЬ**

Афанасенков А.А., Хмель Т.А.	Новосибирск	95
Васнев И.Р.	Новосибирск	100
Вышегородцев К.А., Тропин Д.А.	Новосибирск	104
Гладышев Ю.В., Обуховский А.Д.	Новосибирск	108
Горшенев А.С.	Новосибирск	111
Лукашевич С.В., Желонкин А.Д.	Новосибирск	113
Захаров А.Д.	Новосибирск	116
Косяков В.А.	Новосибирск	119
Кравченко А.К., Краус Е.И.	Новосибирск	124
Куликов В.В.	Новосибирск	126
Маркин В.В.	Новосибирск	131
Маслобоев И.А.	Новосибирск	134
Мельник Е.А.	Новосибирск	138
Михайлова У.В.	Новосибирск	142
Сыроватень А.А.	Новосибирск	152
Костюшин К.В., Червакова А.В.	Томск	156
Червакова А.В., Костюшин К.В.	Томск	159

**Секция ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
И СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛА**

Афанасьев А.Е.	Новосибирск	163
Беляева Е.В., Гагаркина Е.С.	Новосибирск	165
Мешков А.А., Чичиндаева Е.А., Чичиндаев А.В.	Новосибирск	168
Мешков А.А., Чичиндаева Е.А., Чичиндаев А.В.	Новосибирск	170
Пономарев Д.А., Федоренко В.А.	Новосибирск	173
Свяженин И.И., Маслов Н.А.	Новосибирск	176
Соболев Г.А., Маслов Н.А.	Новосибирск	181
Чушкина Е.П., Григорьевская В.М.	Новосибирск	185
Ян Лун Н., Баранов И.Н., Терехов В.И.	Новосибирск	188

**Секция ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

Аркадьева А.И., Токтарев А.В., Панченко В.Н.	Новосибирск	192
Бармакова У.Ю., Ларичкина Н.И., Кадимова А.В.	Новосибирск	195
Бондаренко Ю.И., Бородина О.Ю.	Новосибирск	199
Бородина О.Ю., Глушков С.С.	Новосибирск	203
Вентлянд Е.П., Горбунов Ф.К., Фадина А.А.	Новосибирск	208
Власова Д.А., Пинаева М.В.	Новосибирск	212
Гуровский В.В., Яковлева Л.А., Джумушева С.М.	Новосибирск	215
Казакевич С.В., Маслов Н.А.	Новосибирск	221
Лапин А.В., Бердникова Л.К., Горбунов Ф.К.	Новосибирск	226
Линд Э.В., Черных И.А.	Новосибирск	229
Молотков И.В., Маслов Н.А.	Новосибирск	236
Ларичкин В.В., Нарушев А.О., Ларичкина Н.И.	Новосибирск	241
Онипченко А.П., Бердникова Л.К., Гирш М.В., Горбунов Ф.К.	Новосибирск	246
Романов Д.А., Панченко В.Н.	Новосибирск	250
Ткач В.Ю., Горбунов Ф.К., Фадина А.А.	Новосибирск	253
Трегубова К.В., Громов Н.В.	Новосибирск	257
Черенков И.А., Медведева Т.Б., Громов Н.В.	Новосибирск	261
Черепанова К.С., Громов Н.В., Медведева Т.Б.	Новосибирск	263
Черных И.А., Линд Э.В.	Новосибирск	267
Швыдко А.В., Приходько С.А., Тимофеева М.Н.	Новосибирск	270
Яшутин Н.С., Козорез И.Ф., Паршукова А.К.	Новосибирск	273

**НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ**

**XV Всероссийская научная конференция молодых ученых,  
посвященная Году науки и технологий в России  
г. Новосибирск, 06-10 декабря 2021 г.**

**Сборник научных трудов в 10 частях**

**Часть 10**

*Под редакцией Соколовой Д.О.*

Подписано в печать 15.12.2021. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 16,50. Печ. л. 17,75. Тираж 100 экз. Заказ № Р-00578

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20