

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



Новосибирск
2020

Всероссийская научная
конференция молодых ученых

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

Сборник
научных трудов

Часть 9

г. Новосибирск, 30 ноября-04 декабря 2020 г.

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

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

**Сборник
научных трудов**

**г. Новосибирск, 30 ноября-04 декабря 2020 г.
в 9-и частях**

Часть 9

НОВОСИБИРСК
2020

УДК 62(063)
ББК 72.5я431
Н34

Н34 НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ //Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020.

ISBN 978-5-7782-4288-3

Часть 9: – 222 с.

ISBN 978-5-7782-4297-5

В сборнике публикуются материалы по научным направлениям:
«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

Аманжолова Б.А. д.э.н., профессор, декан ФБ

Хрусталева В.А., д.т.н., профессор, декан РЭФ

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

Тюрин А.Г., к.т.н. доцент, декан МТФ

Белоглазов А.В., к.т.н. доцент, декан ФЭН

УДК 62(063)
ББК 72.5я431

ISBN 978-5-7782-4297-5 (Ч.9)
ISBN 978-5-7782-4288-3

© Коллектив авторов, 2020
© Новосибирский государственный
технический университет, 2020

СЕКЦИЯ ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ПЛАСТИН ИЗ КОМОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЕФЕКТОВ ТИПА РАССЛОЕНИЯ

И.С. Белоусов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия; Новосибирск, fedya417@gmail.com**

В статье рассматривается численно-экспериментальный подход к анализу поведения расслоений в композиционном материале. Приведены результаты натурных испытаний образцов в виде композитных пластин, с заложенным дефектом, на сжатие и результаты численного моделирования данных образцов в программном комплексе ANSYS. Приведено численное решение задачи устойчивости пластины с заложенным дефектом при различных укладках материала и глубине залегания дефекта.

Numerically-experimental approach to analysis of delamination behavior in composite structures is presented. Uniaxial compression test results of composite laminate plates with embedded delamination and results of numerical simulation of these specimens using ANSYS are also presented. The results of stability problem numerical solutions for composite plate with embedded delamination for different layups and different depths of artificial delamination are shown.

Одним из наиболее распространенных видов разрушения элементов конструкций, выполненных из многослойных композитных материалов, является расслоение. Оно обусловлено относительно низкой прочностью межслоевого связующего и приводит к потере конструкцией несущей способности.

Основным источником расслоения композитной структуры являются технологические дефекты в виде межслоевого непрочекля. При определенных уровнях нагрузки на конструктивный элемент в месте таких технологических дефектов происходит локальная потеря устойчивости, и при дальнейшем росте нагрузки зона расслоения увеличивается в размерах. Выявление взаимосвязи между прочностными характеристиками композита и параметрами расслоения является необходимостью, позволяющей определять границы применимости данного слоистого материала при определенных уровнях и видах нагрузок.

Известны подходы дискретного моделирования расслоения композитной структуры [1-3] с использованием программных

комплексов, а также аналитические подходы, основанные на критериях разрушения [4, 5].

В данной работе приводятся результаты лабораторных испытаний на сжатие образцов в виде полосы из композиционного материала со сквозным дефектом, который формировался с помощью закладки между слоями тонкой пленки. Испытания были проведены в СибНИА им. С.А. Чаплыгина.

В программном комплексе ANSYS была реализована параметрическая конечно-элементная модель композитной пластины с предварительным сквозным дефектом, решалась задача устойчивости, а так же задача статического деформирования образца с приложенными сжимающими осевыми нагрузками.

Кроме того, с помощью описанной выше конечно-элементной модели было проведено исследование зависимости критической нагрузки для образца в виде полосы со сквозным дефектом от укладки многослойного композита и глубины залегания дефекта.

Литература:

1. Köllner A., Völlmecke C. An analytical framework to extend the general structural stability analysis by considering certain inelastic effects—theory and application to delaminated composites / *Composite Structures*. – 170 (2017) – pp. 261–270.
2. Köllner A., Kashtalyan M., Guz I., Völlmecke C. On the interaction of delamination buckling and damage growth incross-ply laminates / *International Journal of Solids and Structures*. – 202 (2020). –pp.912–928.
3. Wanga K., ZhaoaL., Hongb H., Gongc Y., Zhongc J., Hu N. An analytical model for evaluating the buckling, delamination propagation, and failure behaviors of delaminated composites under uniaxial compression / *Composite Structures*. – 223 (2019). –p. 110937.
4. Матвеев, К.А. Выпучивание и послекритическое поведение пластин с дефектами / К. А. Матвеев, И. П. Олегин, Д. В. Моховнёв // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2012. – № 1. – С. 105–111.
5. Максименко В.Н., Олегин И.П., Пустовой Н.В. Методы расчета на прочность и жесткость элементов конструкций из композитов. Учебник НГТУ –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. –423 с.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕКТРОДА РЕЗОНАТОРА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА NICA

С.Д. Булатов

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, xsergey97@gmail.com

В работе проводится анализ прочности и жесткости электрода резонатора высокочастотной системы Коллайдера NICA на пригодность к использованию.

In work, the strength and rigidity of the resonator electrode of the NICA Collider high-frequency system for suitability for use.

1. Введение

Целью анализа является проверка пригодности электрода к использованию в высокочастотной системе Коллайдера NICA. Проверка осуществлялась по следующим параметрам: определение прогибов электрода под собственным весом, а также определение напряжений возникающих в электроде находящемся в поле сил тяжести.

2. Анализ модели

Для проведения анализа электрода резонатора был использован программный продукт ANSYS. Был произведен анализ прогибов электрода под собственным весом (Рисунок 1). Прогиб электрода составил 24 микрона, что является допустимым значением. А также были определены напряжения [1] возникающие в электроде находящемся в поле сил тяжести (Рисунок 2). В результате расчета максимальные напряжения в заделке составили 3,88 МПа. Полученное значение напряжений в 18 [2] раз меньше допустимых, для материалов данной конструкции.

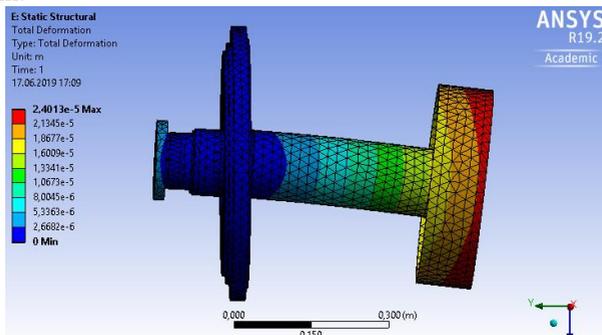


Рис. 1. Прогиб электрода под собственным весом

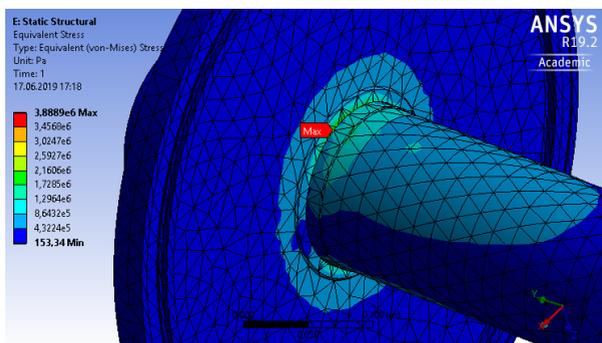


Рис.2. НДС электрода в поле сил тяжести

3. Вывод

Были произведены расчеты напряжений и прогибов электрода в поле сил тяжести. Проведенный анализ полученных результатов показал, что данная конструкция электрода может быть использована в высокочастотной системе Коллайдера NICA.

Литература

1. Прочность, устойчивость, колебания. –Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Панково. –Т.1. – М.: Машиностроение, 1993. – 831 с.
2. Персов Б.З. Расчет и проектирование экспериментальных установок. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – С. 302.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОСЛАБЛЕНИЯ И ИСКЛЮЧЕНИЯ ГИДРОУДАРОВ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МАШИН

А.А. Бурма, Н.А. Маслов

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

В работе рассмотрены способы ослабления и исключения гидроударов в гидравлических системах подъемно-транспортных, путевых, строительных и дорожных машинах, выполнен сравнительный анализ и классификация способов по физическим принципам реализации, разработаны рекомендации по предотвращению последствий гидроударов в гидравлических системах машин.

The paper considers methods of weakening and eliminating water shocks in hydraulic systems of lifting and transport, track, construction and transport machines, a comparative analysis and classification of methods according to the physical principles of implementation are made, recommendations for preventing the consequences of hydraulic shocks in hydraulic systems of machines are given.

Для безопасной эксплуатации гидравлических систем (далее - ГС) подъемно-транспортных, путевых, строительных и дорожных машин (далее – машин) необходимо методическое и материально обеспечение.

Задачи работы: выявить причины возникновения гидроударов в ГС машин; рассмотреть существующие и перспективные технические решения, направленные на ослабление и исключение гидроударов в ГС машин; разработать рекомендации по ослаблению и исключению гидроударов в ГС машин.

Гидроудар - это процесс, вызванный быстрым перекрытием потока и протекающий с резкими колебаниями давления гидравлического масла (далее - масла). Например, при быстром переводе распределителя с закрытым центром из рабочей в нейтральную позицию движущийся от насоса «столб масла» ударяет в запорно-регулирующий элемент (далее - ЗРЭ) распределителя как в непреодолимую преграду. При этом кинетическая энергия потока переходит в потенциальную энергию статического давления. Фронт высокого давления со скоростью звука в масле идёт к насосу, а отразившись от него, вновь идёт к распределителю. После нескольких ходов процесс затухает из-за потерь энергии [1].

При мгновенном перекрытии потока приращение давления наибольшее и определяется по формуле Жуковского [2]:

$$\Delta p_{\max} = \rho v_0 c, (1)$$

где ρ – плотность масла; v_0 – скорость масла до перекрытия потока; c – скорость распространения волны давления (скорость звука в масле). Например, приращение давления при гидроударе (при $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$;

$v_0 = 5 \text{ м/с}$; $c = 1500 \text{ м/с}$) равно 6,75 МПа. При этом приращение настолько быстрое, что предохранительный клапан не успевает открыться.

Рабочее давление в ГС машин постоянно изменяется, при этом изменяется амплитуда пиковых скачков давления. Эти пики давления длятся сотые доли секунд и негативно сказываются на гидромашинах (далее - ГМ) всех типов и приводят к выходу из строя их деталей [3].

В результате анализа схемных решений и конструкций элементов ГС машин было выявлено несколько основных способов ослабления или исключения гидроударов.

Способ №1 «Обеспечение плавного открытия и закрытия «окон» распределителя» заключается в том, что плавное изменение перемещения ЗРЭ и площади цилиндрического «окна» обеспечивают распределителю дросселирующие свойства (плавное регулирование расхода при включении и выключении гидродвигателей, которое снижает скорость масла и приращение давления при гидроударе). Плавно необходимо открывать и закрывать «окна» как силовых, так и

управляющих (при наличии) распределителей (т.е. необходимо дросселировать как силовой, так и управляющий потоки). Наклонные проточки на концах поясков ЗРЭ распределителей улучшают дросселирующие свойства (т.е. «окна» плавно открываются и закрываются). Дросселирование потока управления может быть улучшено и дросселем, установленным в линии управления силовым распределителем. Этот дроссель снижает скорость переключения силового распределителя из нейтральной позиции в рабочую и обратно, т.е. способствует плавному открытию и закрытию «окон» силового распределителя. Такие комплексные решения применены в гидравлическом сервоуправлении машин.

Способ №2 «Выполнение некоторых трубопроводов в виде рукавов высокого давления (далее по тексту - РВД)». При этом способе приращение давления в напорной линии частично компенсируется приращением внутреннего диаметра и объема рукава давления в напорной линии насоса.

Способ №3 «Соединение напорной линии насоса с гидроаккумулятором (далее по тексту - АК) или с тупиковым РВД». Этот способ аналогичен способу №2 и отличается установкой АК или РВД в ответвлении от напорной линии. В системах демпфирования рабочих органов и сцепных устройств машин АК могут быть соединены с рабочими линиями и полостями гидроцилиндров для защиты ГС от реактивных перегрузок [4].

Способ №4 «Установка обратного клапана в напорную линию насоса». Циклические пики давления, вызывающие сильные ударные воздействия на детали гидромашин, возникают в клапанах, РВД и в самих гидромашинах. Давление может превысить конструктивные ограничения для насоса и др. элементов ГС, особенно, если предохранительный клапан открывается или обратный клапан в напорной линии закрывается слишком медленно. В этом случае циклические пики давления превышают максимальное давление в 2-5 раз. Способ заключается в том, что обратный поток масла быстро перекрывает обратный клапан, предотвращая дальнейшее распространение гидроудара, идущего к насосу.

Способ №5 «Применение противоударных клапанов». Противоударные клапаны служат для защиты гидродвигателей и их рабочих гидролиний от реактивных перегрузок (вторичная защита), например, от боковых ударов о колёса при движении в системах рулевого управления машин.

Способ №6 «Применение гидроклапанов-регуляторов». Гидроклапан-регулятор (первичная защита) служит для защиты ГС от инерционных

при разгоне и от активных при работе перегрузок, для остановки исполнительного механизма при срабатывании приборов безопасности и разгрузки нерегулируемого насоса, например, в ГС грузоподъемных машин. Такой клапан имеет большее быстродействие по сравнению с предохранительным клапаном непрямого действия.

Для установления физических принципов рассмотренных способов №1-5 рассмотрен закон сохранения энергии, утверждающий о том, что полное давление p в потоке масла плотности ρ , движущемся со скоростью v , равно сумме гидростатического давления p_{cm} и скоростного $p_{ск}$:

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

На отдельных участках, например в клапанах, дросселях, масло течёт через малые щели. Здесь в разы увеличиваются скорость и скоростное давление. Но, в соответствии с законом сохранения энергии, здесь уменьшается гидростатическое давление, так как часть энергии из потенциальной перешла в кинетическую. Закон сохранения энергии можно записать:

$$p_1 + \rho v_1^2 / 2 = p_2 + \rho v_2^2 / 2 + \Delta p, \quad (3).$$

где Δp – «потерянная механическая энергия», которая перешла в тепловую энергию [2].

Выводы

1. Физический принцип способа №1 основан на преобразовании потерянной механической энергии потока масла в тепловую энергию при дросселировании одного или нескольких потоков масла (управляющего, силового, потока между полостями управления);

2. Физические принципы способов №2 и №3 основаны на аккумулировании энергии масла - кинетической (скоростного давления потока) и (или) потенциальной (гидростатического давления потока) при помощи РВД и АК.

3. Физический принцип способа №4 основан на «отсечке» обратным клапаном энергии масла - кинетической и потенциальной (полного давления потока) масла при перекрытии обратного потока.

4. Физический принцип способа №5 основан на ограничении потенциальной энергии (гидростатического давления) масла в запертых полостях и рабочих линиях гидродвигателей при помощи предохранительного клапана.

5. Физический принцип способа №6 основан на ограничении величины и скорости приращения кинетической энергии (скоростного давления) потока масла в напорной линии насоса при помощи гидроклапана-регулятора.

На основании сделанных выводов предложена классификация способов ослабления или исключения гидроударов по физическим

принципам: преобразование энергии; аккумулярование энергии; «отсечка» энергии; ограничение величины энергии.

Для предотвращения неисправностей ГС, вызванных чрезмерным давлением масла, нужно придерживаться следующих рекомендаций: своевременно контролировать давление настройки предохранительного клапана; устанавливать обратные клапаны в напорные линии для защиты качающих узлов насоса; ограничивать величину градиента давления масла в напорных линиях ГС, например, гидроклапанами-регуляторами, имеющими в своем составе регулятор давления и ограничивающими скорость нарастания давления, например, допускаемой величиной 140...170 МПа/с.

Литература:

1. **Kennedy S., Strait B.** Eliminating Water Hammer: It's a Must // Fluid Power Journal. - 2020. - № 10. - URL: <https://fluidpowerjournal.com/eliminating-water-hammer-its-a-must/> (дата обращения: 02.11.2020).

2. **Мокин Н. В.** Гидравлические и пневматические приводы : учеб. пособие / Сиб. гос. ун-т путей сообщ. - Новосибирск : СГУПС, 2012. - 173 с.

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

4. **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).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКВОЗНОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Н.Я. Доровских, Т.Б. Гоцелюк

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, dorovskix.2015@stud.nstu.ru**

В работе рассматривается методика вычисления коэффициентов интенсивности напряжений с помощью метода конечных элементов на примере растягиваемой пластины с центральной сквозной трещиной.

The paper considers a method for calculating stress intensity coefficients using the finite element method on the example of a stretchable plate with a central through crack.

В современной практике проектирования и расчета воздушных судов зачастую решаются задачи механики разрушения. Материал может иметь различные дефекты структуры: всевозможные включения, пустоты; поверхностные дефекты. В процессе эксплуатации самолета возникает большое количество переменных нагрузок, в результате которых микродефекты могут перерасти в макродефекты – трещины. Одним из наиболее распространенных критериев механики разрушения является коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Эта величина объединяет множество параметров рассматриваемой модели тела с дефектом: материал, форму и размеры трещины и тела, характер приложенной нагрузки. При этом условие разрушения запишется в следующем виде:

$$K_i \geq K_{iC},$$

где i -вид трещины, K_C - критический КИН (или вязкость разрушения), определяемый экспериментально.

Определение КИН в произвольно взятой детали затруднено, поскольку, хоть и существует большая база значений КИН для стандартных моделей, но для большого числа случаев аналитического решения не существует. Однако коэффициенты интенсивности напряжений в произвольном случае можно вычислить с помощью метода конечных элементов. В данной работе был выполнен расчет коэффициентов интенсивности напряжений с помощью метода конечных элементов в программном комплексе Ansys Mechanical APDL на примере растягиваемой пластины с центральной сквозной трещиной. Проведено сравнение полученных результатов со справочным значением.

Программа написана в виде макроса. КИН в программе вычисляется двумя методами: метод аппроксимации перемещений берегов трещины и используя связь энергетического инвариантного интеграла (J-интеграл) со значением КИН. Коэффициент интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва через J-интеграл вычисляется по формуле [1]:

$$K_I = \sqrt{E^* \cdot J}$$

где E^* -приведенный модуль Юнга, при плоском напряженном состоянии (ПНС) равен модулю упругости материала.

Расчетная схема задачи изображена на рис. 1.

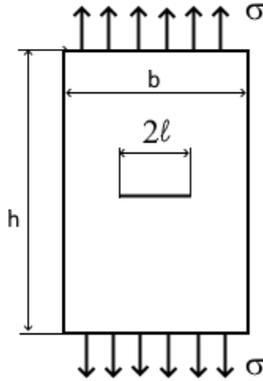


Рис. 1 - Расчетная схема

Поскольку задача симметрична, то в конечно-элементной модели построена четверть пластины с наложением условий симметрии. На верхней грани приложено давление $\sigma=100$ МПа. Пластина считается тонкой, поэтому моделируется ПНС. Элементы – пластинчатые с промежуточными узлами Plane 183. Размеры пластины: $b=1$ м, $h=3$ м, толщина $t=3$ мм. Длина трещины задается в диалоговом окне написанной программы. Вершина трещины для построения регулярной сетки окружена вспомогательной окружностью, а та, в свою очередь, квадратной областью (рис. 2).

Для различных значений длины трещины посчитаны коэффициенты интенсивности напряжений с помощью МКЭ методов и по формуле из справочника [2]:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi l} \cdot F_1(\alpha) \quad \alpha = 2l / b \quad F_1(\alpha) = \sqrt{\sec(\alpha\pi / 2)}$$

Результаты приведены в таблице 1.

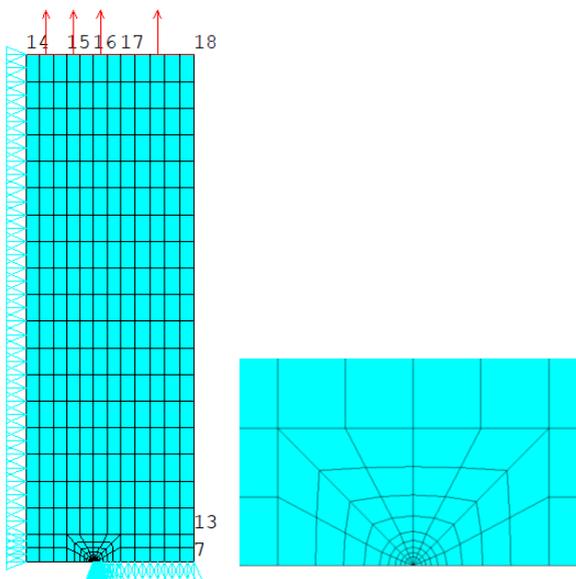


Рис. 2. Конечно-элементная модель

Таблица 1 – Сравнение КИН

Длина трещины $2l, м$	Метод перемещений, $МПа\sqrt{м}$	J-интеграл, $МПа\sqrt{м}$	Справочник [2], $МПа\sqrt{м}$
0.1	40.125661	39.871914	39.879525
0.15	49.321400	49.204369	49.225463
0.2	57.496690	57.430901	57.474046
0.25	65.162474	65.122954	65.196198
0.3	72.637351	72.614649	72.724396
0.35	80.161732	80.149946	80.299172
0.4	87.944645	87.940910	88.127431

Согласно полученным результатам, погрешность вычисления КИН с использованием метода конечных элементов не превышает 1%.

Литература:

1. Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский: Ansys в руках инженера: Механика разрушения. Изд. 2-е, испр. М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
2. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т. / Пер. с англ. под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 448 с.

РАСЧЕТ НДС СИЛОВОЙ ЧАСТИ СТЕНДА ПОЛУРАЗМАХА КРЫЛА САМОЛЕТА ТУ-160

И.А. Зыбарев

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, zybarev29121995@yandex.ru**

Объект исследования - стенд «Полуразмах» для повторно-статических испытаний на функционирование механизации и органов управления поворотной части крыла самолёта ТУ-160. Цель исследования - определение напряженно-деформированного состояния стенда и оценка его усталостной прочности.

The object of the research is a stand for repeated-static tests on the functioning of mechanization and controls of the cut-off part of the wing. The aim of the study is to determine the stress-deformed state of the stand and to assess its fatigue strength.

В ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина в 1980–90-х годах проводились испытания механизации крыльев Ту-154 и Ту-204 на полуразмахах, проектировались и изготавливались стенды. Опыт этих работ был использован при проектировании стенда «Полуразмах». В частности, нагружение закрылков и предкрылков осуществляется посредством кулис, за прототипы которых были взяты кулисы предшествующих стендов. Однако более высокие нагрузки на крыло потребовали разработки оригинального приспособления для его удержания и соответственно расчетов на прочность.

В силовую часть стенда (см. рисунок 1) входят следующие агрегаты:

- продольная рама 1,
- основание 2,
- ложный центроплан (ЛЦ) 3,
- переходная плита 4,
- рычажная система с порталом 5,
- кулисы предкрылка 6,
- кулисы закрылка 7,
- боковые рамы 8.

С использованием конечно-элементных моделей выполнен расчет общей прочности составных частей стенда: ложного центроплана, основания, продольных и боковых рам, порталов и кулис, определены нагрузки на точки крепления конструкции стенда к силовому полу лабораторного корпуса. Показано, что принятые технические решения обеспечивают общую прочность конструкции стенда. Нагрузки в точках крепления стенда к силовому полу не превышают заданных в документации на лабораторный корпус предельных значений.

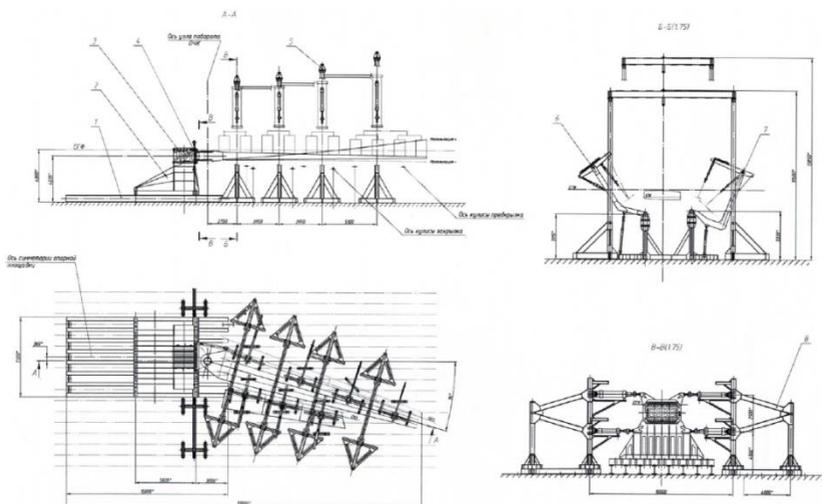


Рис. 1 – Общий вид стенда

По усталостной прочности критическими элементами стенда являются нижние шпильки крепления переходной плиты к ложному центроплану. Для них построены циклограммы напряжений, возникающих при нагружении механизации на полуразмахе крыла. Сделана оценка усталостной долговечности. Предложено использовать затяжку шпилек большим крутящим моментом для создания предварительного напряженного состояния и повышения за счёт этого усталостной долговечности стенда.

Результаты работы рекомендуются использовать для конструкторского сопровождения на этапах изготовления деталей и сборки стенда.

Литература:

1. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем.– М.: Машиностроение, 1991.–336 с.
2. Пустовой Н.В., Матвеев К.А. Основы расчета на устойчивость деформируемых систем. – Новосибирск. Изд-во НГТУ, 1997. –370 с.
3. Матвеев К.А., Попов.И.Н. Исследование устойчивости цилиндрических панелей // Динамика и прочность авиационных конструкций. /Межвуз.сб.науч.тр. – Новосибирск. Изд-во НЭТИ, 1990. – С22-24.

ДИНАМИКА ЭФФЕКТА ДЖАНИБЕКОВА В КВАТЕРНИОНАХ

С. Р. Кравцов, А. И. Родионов

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kravczov.2015@stud.nstu.ru

Рассматривается динамика обнаруженного космонавтом Владимиром Александровичем Джанибековым в 1985 году на КОС «Салют-7» с использованием кватернионов.

The dynamics of the discovered cosmonaut Vladimir Alexandrovich Dzhanibekov in 1985 at the Salyut-7 KOS using quaternions is considered.

1. Введение

Удививший многих эффект был обнаружен на КОС “Салют-7” советским космонавтом Владимиром Александровичем Джанибековым в 1985 году (эффект Джанибекова - ЭД). При распаковке груза, поступившего на станцию, космонавт обратил внимание на то, как крепёжная гайка, пролетев порядка 40 сантиметров, неожиданно совершила кувырок на 180 градусов и полетела дальше: центр масс гайки продолжал равномерное и прямолинейное движение. Пролетев ещё 40 сантиметров, опять перевернулась и так далее.

2. Создание модели

ЭД может быть объяснён на основе «теоремы промежуточной оси – теоремы теннисной ракетки» [1], на основе которой решаются динамические уравнения Эйлера при свободном вращении твёрдого тела в главных осях инерции [2] в предположении, что $I_1 > I_2 > I_3$, где I_1, I_2, I_3 - главные моменты инерции в данной точке:

$$I_1 \dot{\omega}_1 = (I_2 - I_3) \omega_2 \omega_3, \quad (1)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 = (I_3 - I_1) \omega_3 \omega_1, \quad (2)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 = (I_1 - I_2) \omega_1 \omega_2 \quad (3)$$

Продифференцировав (1) и подставив в него $\dot{\omega}_3$ из (3) получим уравнение:

$$I_1 I_3 \ddot{\omega}_1 = (I_2 - I_3)(I_1 - I_2)(\omega_2)^2 \omega_1.$$

Его качественный анализ показывает, что возрастание ω_1 приводит к тому, что вращение вокруг второй оси становится неустойчивым и порождает “кувырок” гайки Джанибекова.

Необходимо решить систему уравнений Ньютона-Эйлера с использованием кватернионов [3,4], вывести зависимости компонент

угловых скоростей от времени и продемонстрировать “кувырок” гайки Джанибекова.

Используем параметры Родрига-Гамильтона [5] и учитываем дополнительное условие, описывающее свойство нормированного кватерниона, который характеризуется единичным вектором \vec{e} с компонентами и аргументов (углом поворота)

$$e_1 = \frac{\lambda_1}{|\vec{\lambda}|}; e_2 = \frac{\lambda_2}{|\vec{\lambda}|}; e_3 = \frac{\lambda_3}{|\vec{\lambda}|}; |\vec{\lambda}| = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2}; \varphi = \arg(\lambda_0 + i \cdot |\vec{\lambda}|).$$

Кладя в основу следующую зависимость: $I_y > I_x > I_z$, получаем [5] систему дифференциальных уравнений, описывающую поворот системы в трёхмерном пространстве:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\lambda}_0 = -\frac{1}{2}(\lambda_1 \omega_x + \lambda_2 \omega_y + \lambda_3 \omega_z) \\ \dot{\lambda}_1 = \frac{1}{2}(\lambda_0 \omega_x + \lambda_3 \omega_y - \lambda_2 \omega_z) \\ \dot{\lambda}_2 = -\frac{1}{2}(\lambda_3 \omega_x - \lambda_0 \omega_y - \lambda_1 \omega_z) \\ \dot{\lambda}_3 = \frac{1}{2}(\lambda_2 \omega_x - \lambda_1 \omega_y + \lambda_0 \omega_z) \\ \dot{\omega}_x = (i_y - i_z) \omega_y \omega_z \\ \dot{\omega}_y = \frac{(i_z - 1)}{i_y} \omega_x \omega_z \\ \dot{\omega}_z = \frac{(1 - i_y)}{i_z} \omega_x \omega_y \end{array} \right. \quad (4)$$

где $i_y = \frac{I_y}{I_x}$, $i_z = \frac{I_z}{I_x}$.

Численно интегрируя полученную систему (4), можно получить зависимость угловых скоростей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ от параметра времени. Анализ системы (4) с полученными зависимостями угловых скоростей покажет, что угловая скорость промежуточного момента инерции ω_x меняет свой знак скачкообразно, что соответствует “кувырку” гайки в невесомости. Именно это и наблюдал В.А. Джанибеков.

3. Вывод

Было рассмотрено явление эффекта Джанибекова с использованием кватернионов. Получена система дифференциальных уравнений, анализ

которой позволяет вывести зависимости угловых скоростей от времени и продемонстрировать «кувырок» гайки в невесомости.

Литература

1. Теорема теннисной ракетки [Электронный ресурс]: Википедия – Электрон. дан. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_теннисной_ракетки.
2. Родионов А.И. Теоретическая механика: конспект лекций с приложениями Ч.3. Динамика / А.И. Родионов, В.Ф. Ким. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 240 с.
3. Гордеев В.Н., Кватернионы и бикватернионы с приложениями в геометрии и механике / В.Н. Гордеев. – Киев: Издательство “Сталь”, 2016. – 316 с.
4. Родионов А.И., Сырецкий Г.А. Кватернионы как одна из составляющих современного математического базиса инженерной подготовки / А.И. Родионов, Г.А. Сырецкий // Сб. матер. междунар. научно-метод. конф.: “Интеграция образовательного пространства с реальным сектором экономики”. (27февраля – 2 марта 2012г.), Ч.2., - Новосибирск: Изд-во СГГА, 2012. - С. 163-168
5. Левин В.Е., Деформирование криволинейных стержней. Часть 2. Статика пространственных криволинейных стержней: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 60 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ВЕРШИНАХ ТРЕЩИНЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В ПАНЕЛИ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ СТРИНГЕРАМИ

Д.А. Кузнецов

**Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, kuznetsovda81@gmail.com**

В работе рассматривается задача о взаимодействии системы приклепанных ребер жесткости с бесконечной анизотропной пластиной постоянной толщины, изготовленной из идеального упругопластического материала, ослабленной одной прямолинейной трещиной.

The paper considers the problem of the interaction of a system of riveted stiffeners with an infinite anisotropic plate of constant thickness, made of an ideal elastoplastic material, weakened by one rectilinear crack.

1. Введение

Использование подкрепленных панелей довольно широко распространено в авиационных конструкциях для обеспечения необходимой прочности при минимальном весе. При изготовлении и эксплуатации, в результате усталости, неправильного обслуживания, коррозии и так далее, в них может образоваться, а впоследствии развиться, трещина. В данном случае важным моментом является способность конструкции сохранять остаточную прочность до тех пор, пока трещина не будет обнаружена и отремонтирована.

Следовательно, для создания безопасных конструкций и их надежной эксплуатации необходимо научиться прогнозировать рост трещины, то есть научиться определять ее критическую длину, при которой произойдет разрушение конструкции.

2. Постановка задачи

В работе рассматривается анизотропная пластина, изготовленная из идеального упругопластического материала, ослабленная одной прямолинейной трещиной длины $2a = a_1 + a_2$, расположенной вдоль оси Ox (внешний контур пластины удален от трещины настолько далеко, что последняя не оказывает существенного влияния на ее напряженное состояние вблизи контура). Берега трещины свободны от внешних усилий. На бесконечности действует однородное растягивающее напряжение $\sigma_y^\infty = \sigma_0$, симметричное относительно прямой, содержащей трещину. Выбор системы декартовых координат и обозначения приведены на рис. 1.

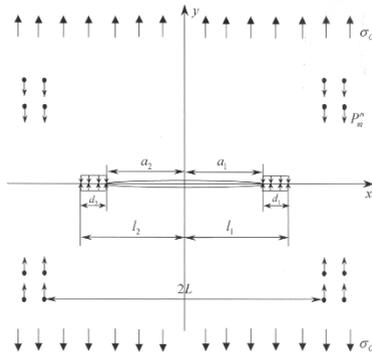


Рис. 1 – Пластина с трещиной

Пластина усилена k стрингерами, расположенными вдоль отрезков, параллельных оси Oy и симметричными данной оси. Стрингеры приклепаны к пластине посредством c^i ($i = \overline{1, k}$) одинаковых заклепок

на каждом из них с постоянным шагом. Податливость крепежа одинакова во всех направлениях и известна. К каждой из заклепок приложены сосредоточенные силы D_m^i ($m = \overline{1, c^l}$). Радиус заклепки мал в сравнении с их шагом и другими характерными размерами.

Действие подкрепляющего набора заменяется неизвестными сосредоточенными силами P_m^n ($m = \overline{1, c^n}$, $n = \overline{1, k}$), приложенными к центрам заклепок в пластине и стрингерах. Номера стрингеров обозначены верхним индексом, а локальная нумерация заклепок на стрингере – нижним.

Трение между пластиной и стрингерами в промежутках между заклепками не учитывается. Также считается, что стрингеры работают как упругопластический однородный континуум, пластина и заклепки изготовлены из одного материала и сцеплены между собой.

Материал пластины считается удовлетворяющим условию пластичности Треска-Сен-Венана, согласно которому максимальное касательное напряжение в каждой точке тела не превышает предела текучести на сдвиг τ_s ($2\tau_s = \sigma_s$, где σ_s – предел текучести на растяжение).

Под действием нагрузки σ_0 и сосредоточенных сил P_m^n , подлежащих определению в ходе решения задачи, на конце трещины будут возникать зоны пластических деформаций. В соответствии со схемой Леонова-Панасюка-Дагдейла, пластическая область будет представлять собой узкий слой на продолжении трещины, толщина которого равна нулю в рамках применяемой теории малых деформаций.

3. Разрешающие уравнения

Пластические зоны будут представлять собой отрезки длины d_i , $i = 1, 2$. На участках $a_1 \leq x \leq l_1$ и $l_2 \leq x \leq a_2$ $l_1 = a_1 + d_1$, $l_2 = a_2 + d_2$) противоположные берега стягиваются с напряжением $\sigma_y = \sigma_s$. Параметры d_i определяются в процессе решения задачи. Граничные усилия рассматриваемой задачи имеют вид:

$$\begin{aligned} \tau_{xy}(x, 0) &= 0 \\ \sigma_y &= \begin{cases} a, & a_2 \leq x \leq a_1 \\ \sigma_s, & l_2 \leq x \leq a_2, a_1 \leq x \leq l_1 \end{cases} ; \end{aligned} \quad (1)$$

Рассматривается случай, когда центр трещины совпадает с началом координат, тогда $a_1 = a_2 = a$, $l_1 = l_2 = l$ и граничные условия примут вид:

$$\begin{aligned} \tau_{xy}(x, 0) &= 0 \\ \sigma_y &= \begin{cases} 0, & |x| \leq a \\ \sigma_s, & a \leq |x| \leq l \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Общее решение задачи записывается в виде

$$\varphi_v(z_v) = \sum_{i=0}^1 \varphi_v^i(z_v) + \sum_{n=1}^k \sum_{m=1}^{c^n} P_m^n \varphi_v^2(z_v), \quad (3)$$

здесь $\varphi_v^0(z_v)$ – решение от действия растягивающих усилий на бесконечности вдоль оси Oy ; $\varphi_v^1(z_v)$ – решение от действия сил сцепления σ_s на берегах трещины при $a_1 \leq x \leq l_1$, $l_2 \leq x \leq a_2$; $\varphi_v^2(z_v)$ – решение от сосредоточенной силы P_m^n , приложенной к m -ой заклепке пластины под n -ым стрингером.

Далее определяется удлинение интервала l_n^λ между N_{n+1}^λ и N_n^λ заклепками под стрингером λ в пластине, записывается условие совместности удлинения интервала между двумя соседними заклепками на стрингере и соответствующего интервала l_n^λ в пластине:

$$\Delta^n l_n^\lambda - \frac{l_n^\lambda}{E_n^\lambda A_n^\lambda} \sum_{m=1}^n (D_n^\lambda - P_m^\lambda). \quad (4)$$

Здесь E_n^λ и A_n^λ – модуль упругости и площадь поперечного сечения стрингера λ на n -ом интервале, $\sum_{m=1}^n (D_n^\lambda - P_m^\lambda) = Q_n^\lambda$ – нормальное усилие.

Условие равновесия всего стрингера:

$$\sum_{m=1}^{c^\lambda} (D_m^\lambda - P_m^\lambda) = 0. \quad (5)$$

Условия (4) и (5) дают разрешающую систему линейных уравнений относительно неизвестных контактных усилий:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^{c^i} P_m^i \cdot 2Re \left\{ \sum_{v=1}^2 S_v(v_\lambda) \left[\begin{aligned} & A_v(v_\lambda) (\ln(z_{v,n+1}^\lambda - z_{vm}^i) - \ln(z_{v,n}^\lambda - z_{vm}^i)) - \\ & - A_v(v_i) (I(z_{v,n+1}^\lambda, z_{vm}^i) - I(z_{v,n}^\lambda, z_{vm}^i)) + \\ & + l_v A_1(v_i) (I(z_{v,n+1}^\lambda, \overline{z_{1m}^i}) - I(z_{v,n}^\lambda, \overline{z_{1m}^i})) + \\ & + n_v A_2(v_i) (I(z_{v,n+1}^\lambda, \overline{z_{2m}^i}) - I(z_{v,n}^\lambda, \overline{z_{2m}^i})) \end{aligned} \right] \right\} + \\ + \frac{l_n^\lambda}{E_n^\lambda A_n^\lambda} \sum_{m=1}^n P_m^\lambda = Q_n^\lambda \quad (6)$$

4. Методика решения

Полученная система уравнений дает однозначное решение поставленной задачи, удовлетворяющее всем принятым допущениям, заданной системе внешних нагрузок, приложенных к пластине, крайвым условиям на линии трещины и в зоне пластичности.

При симметричном расположении стрингеров относительно оси Oy разрешающая система уравнений сводится к определению неизвестных сосредоточенных сил P_m^n , расположенных в правой полуплоскости. При

этом на концах трещины будут возникать зоны пластичности одинаковой длины ($d_1 = d_2 = d$). Расчет зон пластичности производится при помощи итерационного метода. Решается система алгебраических уравнений при некотором определенном значении d^* относительно неизвестных усилий P_m^n . Затем рассчитывается коэффициент интенсивности напряжения K на краю зоны пластичности, где должно выполняться условие $K = 0$. После проверки этого условия, в зависимости от полученного результата, корректируется длина зоны пластичности. Расчет продолжается до тех пор, пока результаты не будут давать выполнение условия с заданной точностью.

5. Заключение

В работе построено общее представление решения задачи с учетом влияния пластических деформаций, определено напряжённо-деформированное состояние пластины, размер зон пластичности, возникающих на концах трещины, а также критическая нагрузка.

Решение задачи построено на базе метода интегральных уравнений. Произведено представление решения в виде комплексных потенциалов и последующее сведение задачи к системе алгебраических уравнений

Литература:

1. Брок Д. Основы механики разрушения.: Пер. с англ. М.: Высш. школа, 1980. 368 с.

1. Максименко В. Н. Приложение метода интегральных уравнений к оценке напряженно-деформированного состояния и разрушения тонкостенных элементов конструкций из металлических и композитных материалов: дис. д-ра техн. наук: 01.02.04 / В. Н. Максименко. – Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1990. – 339 л.

2. Максименко В. Н. Влияние приклепанных стрингеров на напряженное состояние в анизотропной пластине с эллиптическим отверстием или трещиной / В. Н. Максименко, Л. И. Приказчик, Ю. Н. Хан // Прочность и колебания авиационных конструкций: межвуз. сб. – Казань : Изд-во КАИ, 1984. – С. 10–15.

3. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения.: 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. литературы, 1985. - 504 с.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧАСТОТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

П. А. Лакиза, Д. А. Красноруцкий, В. А. Бернс, Е. П. Жуков
Новосибирский государственный технический университет,
Сибирский научно-исследовательский институт авиации
им. С. А. Чаплыгина, г. Новосибирск, qinterfly@gmail.com

Разрабатываемый метод заключается в коррекции математических моделей, полученных путем конечноэлементного моделирования, по заданным собственным частотам.

The method, which is currently under development, is aimed to update mathematical models obtained by finite-element modelling based on given eigenfrequencies.

1. Введение

Конечно-элементные модели (КЭ-модели) широко используются для проведения статистических и динамических расчетов во многих областях техники. Как правило, такие модели содержат неизбежные погрешности моделирования, обусловленные дискретизацией модели, неточностью задания свойств материалов, геометрических характеристик и граничных условий [1]. Для устранения погрешностей моделирования были разработаны различные методы коррекции КЭ-моделей применительно к разным конструкциям: топливным бакам ракет-носителей [2], соплу ракетного двигателя [3], композитному самолету [4], архитектурным сооружениям [5], пластинчатым теплообменникам [6]. В основе этих методов лежит минимизация разницы между ключевыми характеристиками реальной конструкции и параметрами КЭ-модели. В качестве таких параметров могут выступать, например, частоты собственных колебаний и отклик конструкции на динамическое воздействие [7]. Предполагается, что скорректированные таким образом математические модели более точны в описании реального динамического поведения соответствующих им конструкций.

2. Коррекция моделей

Система уравнений собственных колебаний КЭ-модели некоторой конструкции может быть представлена в следующем виде:

$$KX + M\ddot{X} = 0,$$

где K – матрица жесткости, M – матрица масс, X – вектор длиной n , содержащий степени свободы модели.

Предполагается, что матрица масс при конечно-элементном моделировании определяется достаточно точно, поэтому для коррекции

динамических свойств КЭ-модели будем вносить изменения только в матрицу жесткости путем добавления к исходной матрице K матрицы жесткости корректирующей КЭ-модели ΔK . Предлагается строить ΔK на узлах исходной КЭ-модели по принципу формирования матрицы жесткости ферменной конструкции, но с возможностью задания отрицательной жесткости ее упругим элементам для изменения суммарной жесткости конструкции как в сторону увеличения, так и уменьшения. Жесткость каждого такого «ферменного» элемента будет неизвестным параметром коррекции, подлежащим определению из решения задачи безусловной минимизации целевой функции, которая на каждом шаге итерационного процесса является взвешенной суммой квадратов разности текущих и целевых значений частот собственных колебаний. Для минимизации целевой функции используется метод сопряженных градиентов. Итерационный процесс продолжается вплоть до выполнения условия близости частот скорректированной модели к соответствующим целевым значениям или по достижению максимально допустимого числа итераций.

Предлагаемый метод коррекции был протестирован на примере имитационной модели каркаса зонтичной антенны космического аппарата (Рисунок 1). Конструкция была разделена на две составные части: зонтичный каркас (а) и штангу (б), для каждой из которых был проведен экспериментальный модальный анализ (Рисунок 2).



Рис. 1 – Имитационная модель в сборе

Затем по экспериментальным была осуществлена коррекция КЭ-моделей штанги и модели закрепленного в центре зонтичного каркаса. Скорректированная модель зонтичного каркаса была освобождена от закрепления по методу [8]. Была сформирована глобальная модель

конструкции путем сборки КЭ-моделей скорректированных подконструкций по степеням свободы узлов стыковки по принципу формирования глобальной матрицы жесткости в МКЭ.



Рис. 2 – Составные части имитационной модели, (а) – зонтичный каркас, (б) – штанга

Коррекция моделей составных частей привела к удовлетворительному совпадению частот асSEMBЛИРОВАННОЙ модели с соответствующими экспериментальными частотами. Важно отметить, что при коррекции моделей составных частей целевые значения частот были достигнуты с высокой точностью.

Кроме того, проведена коррекция свободной КЭ-модели динамически подобной модели самолета Ту-204 (Рисунок 3) по шести наборам частот собственных колебаний.



Рис. 3 – Динамически подобная модель самолета Ту-204

Целевые частоты при коррекции по каждому из шести наборов были достигнуты с заданной степенью точности.

3. Вывод

Был разработан метод коррекции КЭ-модели конструкций по заданному набору частот. Приведено краткое описание процедуры поиска корректирующих жесткостей в ходе итерационного процесса. Проведена апробация метода на примере имитационной модели каркаса зонтичной антенны космического аппарата и динамически подобной модели самолета Ту-204.

Литература:

1. *Bartilson D.T., Jang J., Smyth A.W.* Finite element model updating using objective consistent sensitivity-based parameter clustering and Bayesian regularization // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, Vol. 114, pp. 328-345.

2. *Li Y., Tian K., Hao P.* Finite element model updating for repeated eigenvalue structures via the reduced-order model using incomplete measured modes // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, Vol. 142.

3. *Yan S., Li B., Li F., Li B.* Finite element model updating of liquid rocket engine nozzle based on modal test results obtained from 3-D SLDV technique // *Aerospace Science and Technology*, 2017, Vol. 69, pp. 412-418.

4. *Zhao W., Gupta A., Regan C.D.* Component data assisted finite element model updating of composite flying-wing aircraft using multi-level optimization // *Aerospace Science and Technology*, 2019, Vol. 95.

5. *Girardi G., Padovani C., Pellegrini D.* Finite element model updating for structural applications // *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2020, Vol. 370.

6. Modeling of plate heat exchanger based on sensitivity analysis and model updating / *Guo Y., Wang F., Jia M., Zhang M* // *Chemical Engineering Re-search and Design*, 2018, Vol. 138, pp. 418-432.

7. *Petersen O.W., Oiseth O.* Sensitivity-based finite element model updating of a pontoon bridge // *Engineering Structures*, 2017, Vol. 150, pp. 573-584.

8. Метод освобождения динамической расчетной модели летательного аппарата / Д. А. Красноруцкий, В. А. Бернс, П. А. Лакиза, В. Е. Левин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 37-44.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ КОНТАКТЕ С ЖЕСТКИМ ТЕЛОМ

Ле Вьет Туан

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, tuanleviet86@gmail.com

В статье рассматривается численное решение задачи контакта жесткой сферы с пластиной из композиционного материала. Расчетная конечно-элементная модель разработана в программном комплексе ANSYS. Приведено численное решение задачи устойчивости пластины при контакте со сферой, радиусом 2 мм.

The article considers a numerical solution of the problem of a rigid sphere contact with a plate made of a composite material. The finite element calculation is performed in Ansys software. The results of stability problem for composite plate in contact with spheres with a radius of 2 mm are shown.

Анализ повреждений, возникающих в композиционных материалах, обусловлен широким применением многослойных материалов в силовых конструкциях. Пятно контакта в композиционном материале порождает область локального разрушения, что оказывает непосредственное влияние на прочность конструкции [1, 2]. Оценка зоны и степени разрушения композита, несомненно, является актуальной задачей.

В исследовании рассматривается задача контакта сферы с пластиной из композитного материала при низкой скорости вдавливания. Предполагается, что сфера не деформируется, все разрушения происходят во внутренних слоях композита.

Исходя из обозначенных предположений, была разработана параметрическая конечно-элементная модель контакта в программном комплексе ANSYS. В модели образец из композитного материала подвергается статической нагрузке, которая приложена к половине поверхности сферы, в то время как другая половина сферы находится в контакте соприкосновения с пластиной (рисунок 1, а). Предполагалось, что сферические индикаторы диаметром 4 - 10 мм изготовлены из конструкционной стали. Для их моделирования применяли четырех узловой тетраэдр. Композитная пластинка размером 30x40 мм, содержала 20 слоев. Для моделирования пластины использовался плоский четырех узловой конечный элемент. Каждый слой состоит из тканого углеродного волокна, армированного эпоксидной смолой. Толщина слоя 0,5 мм, общая толщина пластинки 10 мм. В модели учитывалась укладка слоев. Вдавливание сферы производилось с

усилием от 0 до максимального силы F_{\max} , свидетельствующей о появлении развитой локальной зоны поражения в композите.

При воздействии на композитную пластину сферой диаметром 4 мм, критическая нагрузка F_{\max} составила 4кН, а глубина разрушения 1,03 мм (рисунок 1, б).

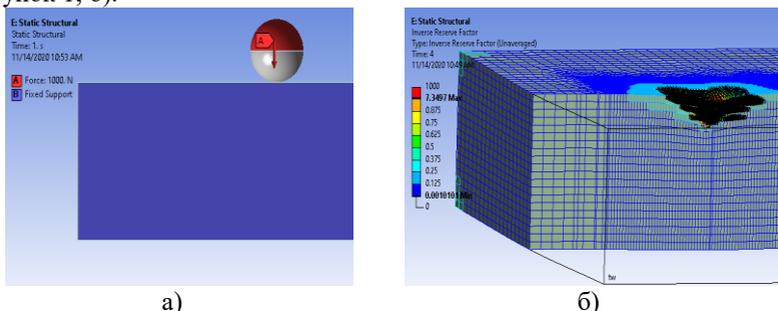


Рисунок 1 – Модель контакта композитной пластины и жесткой сферы: а – схема контакта; б – зона разрушения в композите, $R=2$ мм

Результата численного расчета согласуется с данными экспериментальных испытаний [3].

Литература:

1. Lopes C., Gurdal Z. Simulation of Low-Velocity Impact Damage on Composite Laminates / Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference.– 2009.–с. 167–180.
2. Боркова А.Н., Помахаев В.П., Помахаева Л.И., Дементьева Л.А. Ударостойкость композиционных материалов клеевых / Клеи. Герметики. Технологии.– 2006.– № 10.– с. 24–26.
3. Карпов Е. В. Повреждение многослойного тканого композита низкоскоростным вдавливанием жёсткого сферического индентора / Доклады академии наук.– 2018.– том 478.– № 3.– с. 287–292.

ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д.С. Мосиенко, М.А. Леган
Новосибирский государственный технический университет
ООО «Научно-технологическая инициатива»
г. Новосибирск, legan@hydro.nsc.com

В современном машиностроении важную роль играют покрытия различного назначения. Их свойства и возможные области применения сильно зависят от способа нанесения покрытия. В данной работе представлена установка для холодного динамического напыления и описан принцип её работы. Приведены промежуточные результаты испытаний. Обозначены перспективы разработки деталей и узлов агрегатов установки.

Coatings for various purposes play an important role in modern mechanical engineering. Their properties and possible applications are highly dependent on the coating method. This paper presents an installation for dynamic cold spraying and describes the principle of its operation. Interim test results are given. The prospects for the development of parts and assemblies of the plant units are outlined.

1. Введение

К настоящему времени разработаны и используются десятки методов нанесения покрытий на поверхность деталей. Технологических способов реализации этих методов применительно к конкретным узлам и деталям значительно больше. Однако, несмотря на такое разнообразие существующих способов нанесения покрытий, их все можно укрупнено разделить на ряд групп, различающихся видом используемой энергии, обеспечивающей сцепление слоя покрытия с металлом детали. Основными группами являются термические, термомеханические и адгезионные способы.

2. Холодное динамическое напыление

В данной работе рассматривается способ холодного динамического напыления. При таком способе мелкодисперсные частицы порошка разгоняются в радиальном канале быстровращающегося трубчатого стержня, вылетая из него, попадают в мишени и внедряются в материал. Данный метод может конкурировать с известными методами, а именно: с газопламенным, плазменным, индукционным и детонационным видами напыления, при использовании которых мелкие частицы порошка просто сгорают. Основными преимуществами предлагаемого способа являются возможность напыления частиц размером менее 10 мкм, возможность использования порошков из полимеров, возможность регулирования скорости соударения путём изменения скорости вращения

центробежного ускорителя частиц порошка, меньшая повреждаемость деталей из полимерных материалов.

На рисунке 1 представлены фотографии внедрения частиц порошка меди в подложку из алюминиевого сплава Д16АТ, полученные методом сканирующей электронной микроскопии. Продолжительность нанесения покрытия составила 2 (слева) и 4 (справа) минуты при скорости подачи 1 г/мин.

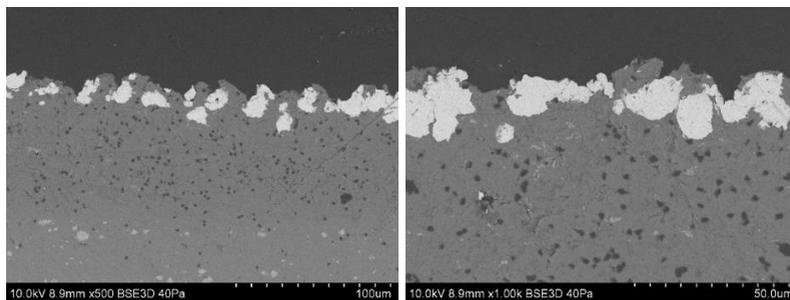


Рис. 1 – Фотографии частиц порошка на поверхности мишени

3. Установка и перспективы развития

Для того чтобы реализовать данный метод необходимо оборудование, способное сообщить частицам порошка скорость примерно равную 1000 м/с. Достижение такой скорости возможно только в вакуумной камере. На рисунке 2 представлена фотография трубчатого ускорителя, который при скорости вращения 30000 оборотов в минуту и общей длине 640 мм за счёт центробежного ускорения разгоняет частицы порошка до радиальной скорости почти равной касательной скорости концов трубки. Если пренебречь трением, то радиальная и касательная скорость частиц будут равны, частицы будут вылетать под углом 45° к касательной и общая скорость частиц будет в $\sqrt{2}$ раз больше скорости концов трубки.



Рис. 2 – Фотография центробежного ускорителя

В перспективе предполагается улучшение конструкции балансировочного диска (Рисунок 3), центробежного ускорителя и оборудования для подачи порошка. Для обеспечения точности балансировки целесообразно увеличить диаметр балансировочного диска. При этом для увеличения допустимой скорости вращения планируется сделать балансировочный диск переменной толщины.

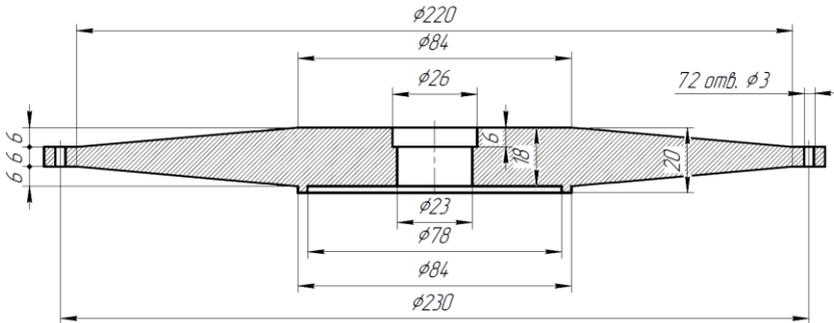


Рис. 3 – Эскиз балансировочного диска

Литература:

1. Проектирование и расчет напряженно-деформированного состояния центробежного ускорителя частиц порошка / М.А. Леган, А.А. Пьянзин, П.И. Зубков, В.П. Зубков, А.В. Таланин // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – № 1 (81). – С. 72-76.
2. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Расчёт на прочность вращающихся дисков. – М.: Машиностроение, 1978. – 247с., ил. – (Б-ка расчетчика).
3. Siemens Documentation: Solid Edge 2020 – Siemens PLM guide, 2020.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЛЯ РАСЧЕТА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОПОРЫ
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

В. В. Немеров

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, nemerov1997@gmail.com**

В данной работе рассматривается расчет частот и форм имитационной модели опоры воздушной линии электропередачи по методу конечных элементов в пакете Ansys. Для проверки корректности результатов, полученных по балочной модели, создана более подробная модель по чертежам из

пластинчатых конечных элементов. В результате сравнения сделан вывод о корректности результатов, полученных по балочной модели.

In this paper, eigenfrequencies and modeshapes of the simulation model of an overhead transmission line tower are calculated by means of the finite element method in the Ansys. To check the adequateness of the results obtained by using the beam model, the shell model was created from the technical drawings. As a result of the comparison, the conclusion was made about the adequateness of the results obtained by using the beam model.

1. Введение

Для решения задачи оценки поврежденности опоры воздушной линии электропередачи (ВЛ) без тщательного осмотра всех силовых элементов ферменной конструкции предлагается решить с помощью модального анализа [1]. Предполагается специальным прибором мерить частоты собственных колебаний и по ним судить о степени поврежденности опоры. Для построения критериев таких оценок необходимо изучить влияние вносимых повреждений на спектр собственных частот на математической модели. Для этого ранее в НГТУ создана имитационная модель опоры ВЛ [2], построена её математическая модель на основе балочных элементов в Ansys [3] (Рисунок 1а). Для неповрежденной опоры экспериментальные значения частот не совпали с частотами собственных колебаний балочной модели. Возможными причинами могут быть:

- 1) отсутствие учета в модели влияния грунта,
- 2) ошибка моделирования балочными элементами.

В данной работе была проверена вторая гипотеза. Для проверки было принято решение создать более подробную математическую модель из оболочечных/пластинчатых конечных элементов.

2. Применение метода конечных элементов

Более подробная модель из плоскостей была создана по рабочим чертежам с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Конструкция состоит из стандартных металлических уголков и соединяющих пластин с болтовыми креплениями (Рисунок 1б). Уголки и пластины моделировались оболочечными конечными элементами типа Shell. Болтовые крепления моделировались заданием контакта типа Bonded 1) по кромкам отверстий, 2) по всей площади контакта уголков и пластин.

Конечно-элементная модель создается автоматическим генератором конечно-элементной сетки. Сходимость результатов проверялась путем измельчения сетки. Значения частот собственных колебаний до и после изменения числа конечных элементов отличаются не более чем на 2%.

Результаты расчета частот собственных колебаний для двух типов соединения уголков и экспериментальные значения приведены в таблице 1.

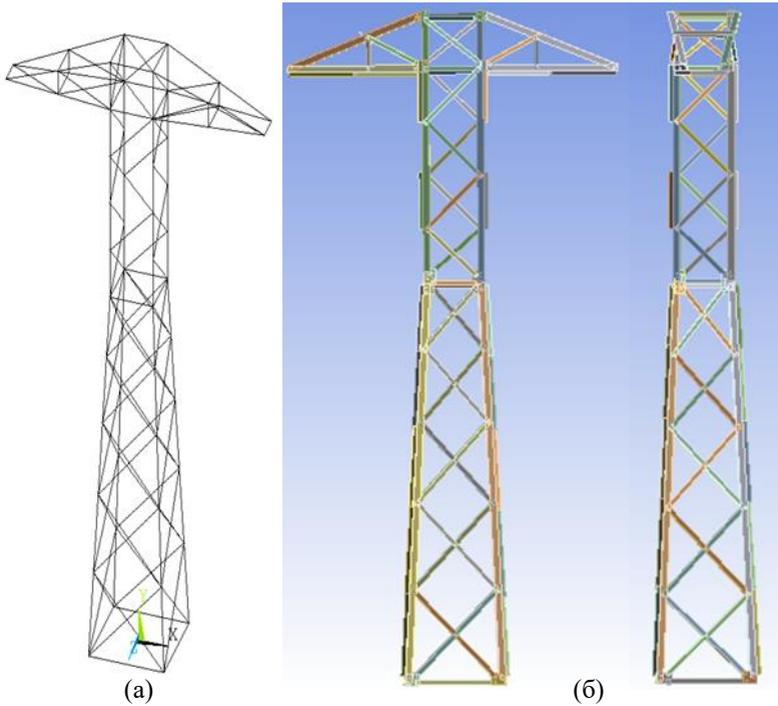


Рис.1 – Модели имитационной опоры ВЛ

Таблица – 1 Сравнение результатов расчета

Номер частоты	Эксперимент	Балочная КЭ-модель	*Оболочечная КЭ-модель (1)	**Оболочечная КЭ-модель (2)
1	10.5 Гц	14.598 Гц	14.439 Гц	15.032 Гц
2	11.6 Гц	14.793 Гц	14.484 Гц	15.113 Гц
3		31.605 Гц	23.758 Гц	27.935 Гц
4		66.417 Гц	55.111 Гц	60.879 Гц
5		77.979 Гц	59.461 Гц	68.292 Гц

*Оболочечная КЭ-модель (1) – это имитационная модель опоры ВЛ, элементы в которой соединены контактом «отверстие с отверстием».

**Оболочечная КЭ-модель (2) – элементы соединены условием «поверхность с поверхностью».

3. Вывод

В результате проведенного исследования установлено, что модель, созданная из пластинчатых конечных элементов, дает практически такие же частоты собственных колебаний, что и балочная. Разное моделирования контакта приводит к увеличению частот собственных колебаний, тогда как экспериментальные частоты ниже. Поэтому можно сделать вывод о том, что для расчета частот и форм собственных колебаний металлических опор ВЛ можно использовать балочную модель, а также необходимо учитывать податливость грунта, которая существенно снижает частоты собственных колебаний. Последнему аспекту и планируется уделить внимание в дальнейших исследованиях.

Литература

1. Хейлен, Ламменс, Сас П. Модальный анализ: теория и испытания. М.: «Новатест», 2010. – 319 с.

2. Запысова Е. А. Исследование влияния дефектов в элементах конструкции на спектр частот собственных колебаний на примере имитационной модели опоры ВЛ / Е. А. Запысова, А. Н. Кожевников, Д. А. Красноруцкий ; науч. рук. В. Е. Левин // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 18–20 апр. 2018 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1. – С. 40–44.

3. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в ANSYS Workbench: Учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с.: ил.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ГИДРОДВИГАТЕЛЕЙ МАШИН

А.А. Саклаков, Н.А. Маслов

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

Рассмотрены способы питания и управления параллельно работающими гидравлических двигателей, имеющих перспективы применения в подъемно-транспортных, путевых, строительных и дорожных машинах. Приведены схемы современных гидравлических систем машин с LS/PC (Load Sensing / Pressure Compensation) и PPPC (Proportional Priority Pressure Compensation)

управлением. Выполнено сравнение способов питания и управления параллельно работающими гидродвигателями, а также схем гидросистем их реализующих.

Methods of power supply and control of parallel operating hydraulic motors having prospects of application in lifting and transport, track, construction and transport machines are considered. Diagrams of present-day hydraulic systems of machines with LS/PC (Load Sensing / Pressure Compensation) and PPPC (Proportional Priority Pressure Compensation) control are presented. Methods of power supply and control of parallel operating hydraulic motors, as well as diagrams of hydraulic systems implementing them are compared.

Цель работы - методическое обеспечение выбора способа питания и управления параллельно работающими гидродвигателями машин.

Задачи работы: рассмотреть способы питания и управления параллельно работающими гидравлическими двигателями (далее - ГД), имеющих перспективы применения в горных, строительных и дорожных машинах (далее - машинах); рассмотреть схемы современных гидравлических систем (далее - ГС) машин с LS/PC (Load Sensing / Pressure Compensation) и PPPC (Proportional Priority Pressure Compensation) управлением; выполнить сравнение способов питания и управления параллельно работающих ГД, а также схем ГС их реализующих; дать рекомендации по применению способов питания и управления параллельно работающих ГД в ГС машин.

Введение. Рассмотрим вопрос распределения расхода между параллельными гидролиниями. Если в параллельных линиях только линейные и местные сопротивления, то между такими линиями расход гидравлического масла (далее - масла) распределяется обратно пропорционально их сопротивлениям. Если в параллельных линиях только ГД и их выходные звенья не одинаково нагружены, то весь расход насоса пойдёт через ГД с меньшей нагрузкой на выходе и соответственно с меньшим необходимым давлением в его напорной линии. При этом выходные звенья других ГД не перемещаются. Это говорит о невозможности одновременной работы параллельно включенных ГД от одного насоса без специальных устройств деления расхода (проблема №1). В качестве таких устройств могут быть применены, например, делители потока (далее - ДП) дроссельного [1-3] и объемного [4-6] типов. При использовании ДП (а не распределителя потока), обеспечивается только одновременная работа всех ГД, так как при остановке или отключении одного из ГД, остальные выключаются (проблема №2). Это объясняется принципами действия существующих ДП потока. Применение управляемого делителя потока обеспечивает параллельное соединение потребителей с или без деления потока, но не исключает проблем №2 или №1.

В машинах компании Caterpillar и других фирм для распределения расхода между параллельными гидролиниями для обеспечения одновременной и неодновременной работы потребителей используют специальные схемы, например, LS/PC [7] и PPPC [8].

Компенсированные по давлению, чувствительные к нагрузке гидросистемы LS/PC. PC – pressure compensation (компенсация по давлению) – так названо поддержание постоянного перепада давления на запорно-регулирующем элементе (далее - ЗРЭ) распределителя. В результате при неизменной площади открытого «окна» остаются постоянными расход масла через распределитель и скорость гидродвигателя при изменении нагрузки. LS – loadsensing (нагрузочная чувствительность) – это автоматическое поддержание давления насоса на уровне, необходимом для преодоления нагрузки на гидродвигатель, плюс запас по давлению. Гидросистемы LS/PC, сочетающие свойства PC и LS, применены в гидросистемах с закрытым центром и насосами с LS-регуляторами (например, в экскаваторах-погрузчиках и бульдозерах, в рулевом управлении многих машин).

Пропорциональные приоритетные с компенсацией давления гидросистемы PPPC. P (Proportional) – пропорциональная; P (Priority) – приоритетная (приоритет гидропривода рабочего оборудования над гидроприводом ходового оборудования машины); PC (Pressure Compensation) – с компенсацией давления. Общие свойства с гидросистемой LS/PC: применение PPPC (аналогично LS/PC) – гидроприводы с закрытым центром и совместно работающими гидродвигателями, запитанными от общего насоса; по свойствам PC и LS гидросистема PPPC аналогична гидросистеме LS/PC с регулируемым насосом (обеспечивает постоянство скорости ГД при изменении нагрузки и автоматически увеличивает расход насоса при увеличении расхода, требуемого для ГД. Системы PPPC применены в машинах: погрузчики с телескопической стрелой; погрузчики; автогрейдеры; колёсные и гусеничные экскаваторы [8]. Управление распределителями – «любое» (мускульное, гидравлическое, электрическое, электрогидравлическое, электрогидравлическое пропорциональное). Выполнено сравнение гидросистем LS/PC и PPPC. Результаты сравнения приведены в Таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение гидравлических систем LS/PC и PPPC

Гидравлическая система LS/PC с нерегулируемым или регулируемым насосом	
Достоинства	Недостатки
1. Компенсация по давлению (свойство PC) – поддержание перепада давления на	1. Останавливается наиболее нагруженный ГД,

<p>ЗРЭ и расхода через распределитель, и скорости ГД, независимо от нагрузки ГД и давления на входе ГД. Это свойство обеспечивают клапан постоянной разности давлений на ЗРЭ дросселирующего распределителя.</p> <p>2. Чувствительность к нагрузке (свойство LS) – обеспечение заданного превышения давления на выходе насоса по сравнению с максимальным рабочим давлением. Это достигается применением регулятора расхода и дросселированием излишка масла в бак, если насос нерегулируемый, или изменением расхода регулируемого насоса.</p>	<p>если давление на входе ГД превышает максимальное или требуемый ГД расход превышает максимальный.</p> <p>2. Большие потери энергии на дросселирование излишка и нагрев масла, низкий КПД ГС с нерегулируемым насосом. При использовании регулируемого насоса потери энергии уменьшаются в несколько раз.</p>
<p>Гидравлическая система РРРС с регулируемым насосом</p>	
<p>Достоинства</p>	<p>Недостатки</p>
<p>1. Возможность питания одним насосом нескольких ГД.</p> <p>2. Скорость ГД не зависит от нагрузки, пока расход насоса превышает суммарный расход, требуемый для совокупности ГД.</p> <p>3. Если расход насоса меньше требуемого для совокупности ГД, то расход насоса - максимальный. Если максимального расхода недостаточно, то совокупность компенсаторов давления и ЗРЭ распределителей разделит его между всеми ГД пропорционально положениям ЗРЭ. При этом скорость всех ГД уменьшится, но ни один ГД не остановится.</p> <p>4. Нет слива излишков, чрезмерного нагревания масла и снижения КПД привода.</p> <p>5. Если давление одного из ГД (давление в сигнальном контуре) приблизится к допустимому давлению насоса на величину настройки клапана ограничения давления в регуляторе насоса, то насос перейдет на минимальную производительность, т.е. насос и дизель - разгружены.</p>	<p>1. Сложность схемы;</p> <p>2. Недостаточная чувствительность управления.</p>

Выводы:

1. Наиболее гарантированное обеспечение одновременной и неодновременной работы ГД, работающих при разных или одинаковых нагрузках, обеспечивается современной например, в гидравлической системой PPPC.

2. Если нагрузки одинаковы и перепады давления на ГД одинаковы, то работоспособна наиболее простая параллельная схема соединения ГД с источником расхода.

3. При разных нагрузках и одновременной работе ГД целесообразно применение ДП.

4. Альтернативным является вариант запитывания ГД от разных источников расхода. Такой вариант реализован, например, в гидравлической системе NFC (Negative Flow Control) некоторых экскаваторов [10-11].

Литература:

1. *Свешников В.К.* Станочные гидроприводы: Справочник. - М., 2008. - 640 с.

2. *Васильченко В.А.* Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник. - М., 1983. - 301 с.

3. RE 64592. Traction module (Flow divider) RTM. Технические данные. Bosch Rexroth AG, 2016. - 22с.

4. 86.00:00.000-01 ТО. Кран укладочный УК-25/9-18. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2004. - 121с.

5. Попович М.В. и др. Путевые машины. М., «Транспортная книга», 2009. - 819с.

6. ЦПО-3.2000. Типовая инструкция по техническому обслуживанию гидрооборудования^[11] железнодорожно-строительных машин – М.: ПТКБ ЦПМПС, 2001. – 167с.

7. RENR3914-01. D9R Track-Type Tractor Hydraulic System. Schematic. Caterpillar. January 2005. – 24р.

8. RENR7366-01. 385C Excavator Hydraulic System. Schematic. Caterpillar. August 2008. – 24р.

9. RRS 92 711/03.00. Насос регулируемый A10VSO для открытых систем. Технические данные. Brueninghaus Hydromatik GmbH, 2000. – 40с.

10. RRS 93 010/10. Аксиально-поршневой регулируемый двоярный насос A8V0. Технические данные. Bosch Rexroth AG, 2005. - 32с.

11. RENR7296-03. 320D & 320D L Excavator Hydraulic System Schematic. Caterpillar. July 2007. – 16р.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Д.Р. Шелевая, Д.А. Красноруцкий
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, shelevayad@mail.ru

В статье представлена методика расчета малых колебаний стержневой системы относительно достигнутого геометрически нелинейного статического состояния, которое описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Приведены формулы для получения краевой задачи на собственные значения по методу конечных разностей.

In this paper a method for calculating small vibrations of a rod system relative to the achieved geometrically nonlinear static state, which is described by a system of nonlinear differential equations is presented. Formulas for deriving the boundary eigenvalue problem using the finite difference method are specified.

1. Введение

Дифференциальная стержневая модель [1-3] может быть использована для расчета совместных колебаний проводов и опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) [4]. Стержневая система моделирует провода и гирлянды изоляторов, а опоры заменяются редуцированными конечно-элементными (КЭ) моделями, содержащими несколько низших тонов собственных колебаний полноразмерной КЭ-модели. В данной работе рассматривается методика расчета малых колебаний этой стержневой системы относительно достигнутого геометрически нелинейного состояния механического равновесия. По частотам малых колебаний можно судить о динамической устойчивости системы. Такой анализ можно применить для прогнозирования возможности возникновения явления пляски проводов ВЛ.

2. Методика расчета малых колебаний

Рассмотрим получение краевой задачи для малых колебаний сначала на примере одного стержня, а затем обобщим результат на систему нескольких стержней [3]. Система уравнений движения стержня при больших перемещениях и поворотах [2] в матричном виде имеет следующий вид:

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

где $\mathbf{X}(\xi, t) = \{U_{1,2,3}(\xi, t), \omega_{1,2,3}(\xi, t), Q_{1,2,3}(\xi, t), M_{1,2,3}(\xi, t)\}^T$, ξ – параметр длины стержня, t – время, $U_{1,2,3}$, $\omega_{1,2,3}$, $Q_{1,2,3}$, $M_{1,2,3}$ –

глобальные проекции векторов перемещений, поворота, внутренних усилий и моментов, точки означают дифференцирование по времени.

Рассмотрим новое равновесное состояние, близкое к состоянию (1), выраженное через малое отклонение:

$$\frac{d(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X})}{d\xi} = \mathbf{F} \left[\xi, (\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}), (\dot{\mathbf{X}} + \Delta\dot{\mathbf{X}}), (\ddot{\mathbf{X}} + \Delta\ddot{\mathbf{X}}) \right], \quad (2)$$

где $\Delta\mathbf{X}(\xi, t) = \{\Delta U_{1,2,3}(\xi, t), \Delta\omega_{1,2,3}(\xi, t), \Delta Q_{1,2,3}(\xi, t), \Delta M_{1,2,3}(\xi, t)\}^T$ – малое отклонение от (1).

Разложим (2) в ряд Тейлора в окрестности точки $(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}})$, оставим слагаемые, содержащие только первую степень функций-отклонений:

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\xi} + \frac{d\Delta\mathbf{X}}{d\xi} = \mathbf{F}(\xi, \mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}) + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\Delta\mathbf{X} + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\dot{\mathbf{X}}}\Delta\dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}}\Delta\ddot{\mathbf{X}},$$

вычтем равновесное состояние (1):

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{d\xi} = \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\Delta\mathbf{X} + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\dot{\mathbf{X}}}\Delta\dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}}\Delta\ddot{\mathbf{X}}. \quad (3)$$

Решение (3) будем разыскивать в экспоненциальном виде:

$$\Delta\mathbf{X}(\xi, t) = \Delta\mathbf{X}^A(\xi) \cdot \exp(i\omega t), \quad (4)$$

Подставим (4) в (3), для амплитуд сохраним прежнее обозначение без верхнего индекса «A»:

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{d\xi} = \left[\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}} + i\omega \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\dot{\mathbf{X}}} - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}} \right] \Delta\mathbf{X}. \quad (5)$$

Для определения амплитуд-функций малых колебаний к линейным дифференциальным уравнениям (5) необходимо добавить краевые условия в начале и конце стержня:

$$\mathbf{G}_1(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{G}_2(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}. \quad (6)$$

Задача определения $\Delta\mathbf{X}$ и ω из (5-6) – называется линейной краевой задачей на собственные значения. Для численного решения линейной краевой задачи на собственные значения (5-6) применим метод конечных разностей, решение будем искать в $N + 1$ дискретной точке, разностная схема будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial\mathbf{F}_i}{\partial\mathbf{X}} + \frac{2}{h_i}\mathbf{I} + i\omega \frac{\partial\mathbf{F}_i}{\partial\dot{\mathbf{X}}} - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{F}_i}{\partial\ddot{\mathbf{X}}} \right] \Delta\mathbf{X}_i + \\ & + \left[\frac{\partial\mathbf{F}_{i+1}}{\partial\mathbf{X}} - \frac{2}{h_i}\mathbf{I} + i\omega \frac{\partial\mathbf{F}_{i+1}}{\partial\dot{\mathbf{X}}} - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{F}_{i+1}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}} \right] \Delta\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Разностная схема (7) получена для общего случая малых колебаний диссипативной системы. Для определения собственных частот нужно положить в (7) $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \dot{\mathbf{X}}} = \mathbf{0}$.

Проделав те же операции разложения в ряд, линеаризации и вычитания равновесного состояния и подстановки решения (4), краевые условия (6) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{G}_1}{\partial \mathbf{X}} \Delta \mathbf{X}_1 + i\omega \frac{\partial \mathbf{G}_1}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \Delta \mathbf{X}_1 - \omega^2 \frac{\partial \mathbf{G}_1}{\partial \ddot{\mathbf{X}}} \Delta \mathbf{X}_1 &= \mathbf{0}, \\ \frac{\partial \mathbf{G}_2}{\partial \mathbf{X}} \Delta \mathbf{X}_{N+1} + i\omega \frac{\partial \mathbf{G}_2}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \Delta \mathbf{X}_{N+1} - \omega^2 \frac{\partial \mathbf{G}_2}{\partial \ddot{\mathbf{X}}} \Delta \mathbf{X}_{N+1} &= \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для удобства введем обозначение $\mathbf{x} = \Delta \mathbf{X}$, тогда для одного стержня схема (7) с краевыми условиями (8) переписывается в матричном виде

$$(\mathbf{A} + i\omega \mathbf{B} - \omega^2 \mathbf{C}) \mathbf{x} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

Для решения (9) в общем случае введем тождественное обозначение $\omega \mathbf{x} = \Delta \dot{\mathbf{x}}$.

После подстановки обозначения (10), умноженного слева на матрицу \mathbf{C} в (9) получим:

$$\begin{aligned} \{\mathbf{A}\mathbf{x} + i\omega \mathbf{B}\mathbf{x} - \omega \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}\} &= \mathbf{0}, \\ \omega \mathbf{I}\mathbf{x} &= \mathbf{I}\dot{\mathbf{x}}, \end{aligned}$$

где \mathbf{I} – единичная матрица.

В матричной форме последние уравнения запишутся:

$$\left(\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} - \omega \begin{bmatrix} -i\mathbf{B} & \mathbf{C} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (11)$$

или $(\bar{\mathbf{A}} - \omega \bar{\mathbf{B}}) \mathbf{Z} = \mathbf{0}$, где $\bar{\mathbf{B}}$ – комплексная матрица. Полученная комплексная обобщенная проблема решается с помощью пакета подпрограмм с открытым исходным кодом ARPACK, процедура `znauprd`.

Проблема (11) в случае отсутствия демпфирования упрощается в обобщенную проблему собственных значений

$$(\mathbf{A} - \omega^2 \mathbf{C}) \mathbf{x} = \mathbf{0}. \quad (12)$$

3. Обобщение на систему стержней

Полученные результаты можно обобщить на случай нескольких стержней. Рассмотрим систему n стержней, для i -го стержня будем иметь обобщенную проблему типа (9):

$$\mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + i\omega_i \mathbf{B}_i \dot{\mathbf{x}}_i - \omega_i^2 \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i = \mathbf{0},$$

условия сочленения стержней сформируют матрицы A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} , $i \neq j$, тогда аналогично (9) можно записать обобщенную проблему для системы стержней:

$$\tilde{A}\tilde{x} + i\omega\tilde{B}\tilde{x} - \omega^2\tilde{C}\tilde{x} = \mathbf{0}, \quad (13)$$

где \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{C} – блочные матрицы, состоящие из A_{ij} , B_{ij} и C_{ij} соответственно, \tilde{x} – вектор, состоящий из x_i . Для решения (13) используется ARPACK, при этом для решения соответствующей СЛАУ при решении обобщенной проблемы можно использовать методику [3] или любой решатель СЛАУ.

4. Выводы

Из уравнений геометрически нелинейного динамического деформирования стержня с помощью метода конечных разностей получены уравнения (13) для краевой задачи на собственные значения стержневой системы для общего неконсервативного случая, когда в системе присутствуют диссипативные силы. Их можно применить для анализа возможности возникновения динамической неустойчивости.

Литература:

1. Механика деформирования криволинейных стержней: монография / Н. В. Пустовой, В. Е. Левин. - : Новосибирск, изд. НГТУ, 2008. - 208 с.
2. Pustovoy N. V. The numerical algorithm for solving the nonlinear boundary problem of the thin rod under dynamic deformations / N. V. Pustovoy, V. E. Levin, D. A. Krasnorutskiy // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика = PNRPU Mechanics Bulletin. - 2018. - № 3-4. - С. 77-87. - DOI: 10.15593/perm.mech/eng.2018.3.08.
3. 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
4. Расчет совместных колебаний проводов и опор участка воздушной линии электропередачи при действии периодической ветровой нагрузки = Joint oscillations calculation of conductors and transmission poles within section of an overhead transmission line under the action of periodic wind load / А. Я. Кравченко, Д. А. Красноруцкий, В. Е. Левин, С. В. Роденко // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2018. - № 2 (47). - С. 58–63.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТ СТАБИЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

А.М. Щеголихин, Н.А. Маслов

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

В работе выполнено обоснование выбора параметров динамического стабилизатора железнодорожного пути, влияющих на осадку пути, даны рекомендации по выбору параметров для системы мониторинга динамического стабилизатора.

In this work, the substantiation of the choice of the parameters of the dynamic stabilizer of the railway track, affecting the draft of the track, is given, recommendations are given on the choice of parameters for the monitoring system of the dynamic stabilizer.

Динамический стабилизатор пути (далее – ДСП) предназначен для ускоренной и контролируемой стабилизации железнодорожного пути (далее - пути) с сохранением в пределах допусков и норм содержания его положения в продольном профиле, по уровню и в плане. ДСП производят искусственное осаживание рельсов под действием вибраций, сочетающихся с вертикальным режимом рельсошпальной решетки (далее - РШР), ускоряют стабилизацию балластного слоя в подшпальной зоне, производя также и глубинное уплотнение балласта [1].

Цель работы - методическое обеспечение выбора параметров ДСП, влияющих на эффект стабилизации пути.

Задачи работы: обоснование выбора параметров ДСП, влияющих на осадку пути; разработка рекомендаций по выбору параметров для системы мониторинга ДСП.

Параметры, влияющие на стабилизацию пути: частота стабилизации пути; вертикальная статическая нагрузка, передаваемая через гидроцилиндры прижима виброблоков на блок динамической стабилизации пути; скорость движения ДСП; динамическая сила удара виброблока. Первые три параметра во время работы ДСП бесступенчато регулируются системой управления, а динамическая сила удара задана эксцентриковыми массами виброблока. Динамическая сила удара также зависит от частоты колебаний виброблока.

По сравнению с остальными параметрами частота стабилизации пути оказывает преобладающее влияние на эффективность работы ДСП. Это влияние основывается на двух факторах: упруго-эластичные

свойства щебня, которые увеличиваются с повышением частоты («щебень течет»), и, с другой стороны, квадратичное приращение динамической силы удара с повышением частоты колебаний виброблоков.

Рабочую частоту колебаний виброблоков можно регулировать в диапазоне от 0 до 45 Гц, эта частота обеспечивает эквивалентную ей частоту стабилизации пути. Обычно оператор машины выбирает такую рабочую частоту, при которой обеспечена плавность хода ДСП (обычно от 28 до 35 Гц).

Вертикальная статическая нагрузка на блок динамической стабилизации пути оказывает меньшее, чем частота колебаний виброблоков, влияние на получаемую ДСП величину осадки пути. В условиях увеличивающегося вертикального напряжения в щебне горизонтальные удары виброблоков ДСП приводят к увеличению смещений зерен щебня. Поэтому зерна перераспределяются в более плотное состояние.

Через давление в гидроцилиндрах можно бесступенчато регулировать вертикальную статическую нагрузку на блок динамической стабилизации пути в диапазоне от 0 до 240 кН. В рабочем режиме заранее устанавливается минимальная вертикальная нагрузка около 70 кН, которая обеспечивает надежное закрепление блока динамической стабилизации пути [2].

Результаты проведенных экспериментов показывают, что эффект динамической стабилизации пути незначительно зависит от скорости работы ДСП, что может оказаться не совсем понятным.

Известна зависимость (1) для расчета осадки пути e_N после N циклов нагружения [3]:

$$e_N = e_1 + e_1 \cdot b \cdot \ln(N), \quad (1)$$

где e_1 – осадка после первого цикла нагружения; b - константа.

Из зависимости (1) следует, что первые циклы нагружения пути приводят к большой осадке пути. Например, для полной стабилизации подбитого балласта пути после эксплуатационной нагрузки в 2 млн. тонн груза, при средней величине подъёмки пути подъёмно-рихтовочным устройством выправочно-подбивочно-рахтовочной машины (далее - ВПР) и средней величине осадки пути в 10 мм, полученной ДСП, и при средней осевой нагрузке подвижного состава в 12 тонн получено: $e_1 = 4,55$ мм и $N = 70$. Известны результаты экспериментов, проведенных при строительстве автомобильных дорог. Так основная осадка, достигаемая машинами для уплотнения грунта, происходит после 70-100 вибровоздействий на грунт. Поэтому после около 70 эквивалентных циклов нагружения РШР достигается и

необходимая величина осадки пути в 10 мм. На Рисунке 1 приведен график зависимости эффективности динамической стабилизации пути от рабочей скорости ДСП. Эффективность динамической стабилизации пути определена цифрой 1 при рабочей скорости ДСП около 1,5 км/ч.

Результаты практического применения ДСП с последующими измерениями осадки пути позволили определить взаимосвязь между достигаемой величиной осадки пути и увеличением сопротивления поперечному сдвигу пути. Подбивка сокращает имеющееся на полностью стабилизированном пути сопротивление поперечному сдвигу пути приблизительно на 40%. На Рисунке 2 представлен график зависимости увеличения сопротивления поперечному сдвигу пути, достигаемое осадкой пути. Если увеличение составляет 50%, то сопротивление поперечному сдвигу пути, которое после подбивки балласта машиной ВПР находится на уровне 60%, путем стабилизации снова увеличивается до 80% [3].

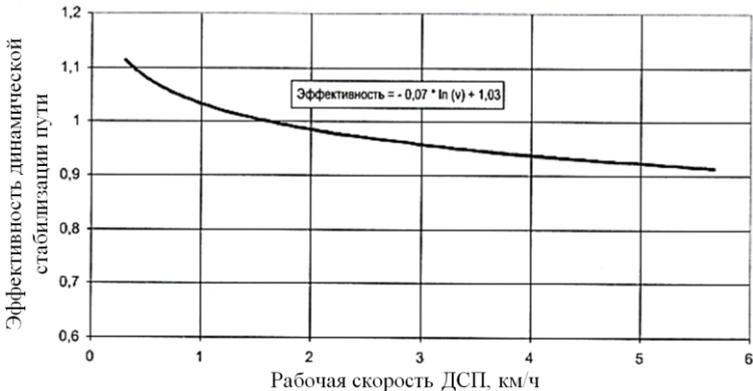


Рис. 1 – Влияние рабочей скорости ДСП на эффективность динамической стабилизации пути

Наибольший эффект динамической стабилизации пути достигается ДСП в зоне действия максимальной силы среза балласта в пределах участка подбивки балласта, поэтому глубина вибровоздействия ДСП на балласт может быть около 150 мм.

Экспериментально доказано, что повышение сопротивления пути поперечному сдвигу благодаря использованию ДСП равняется эксплуатационной нагрузке не менее 100 тыс. тонн [4,5].

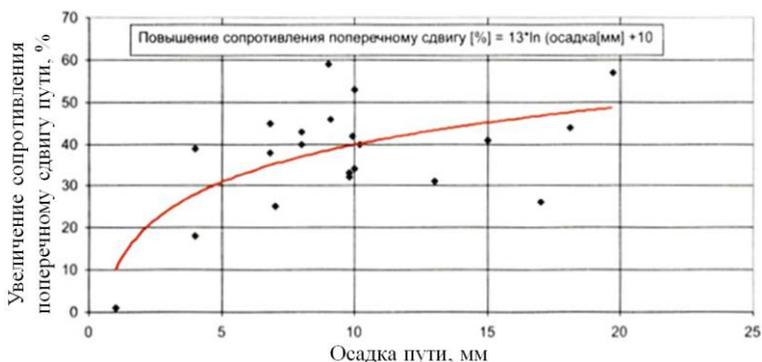


Рис. 2 – Влияние осадки пути на увеличение сопротивления поперечному сдвигу пути

Выводы:

1. Преобладающим влиянием на эффект стабилизации пути оказывает частота колебаний виброблоков ДСП, которая регулируется в диапазоне от 0 до 45 Гц (обычно от 28 до 35 Гц для плавного хода ДСП).

2. При увеличении статической нагрузки на рельсошпальную решетку, щебень может перераспределяться в более плотное состояние.

3. Эффективная рабочая скорость движения ДСП около 1,5 км/ч.

Таким образом, для контроля качества работы ДСП необходимо как минимум контролировать частоту колебаний виброблоков, давление масла в гидроцилиндрах прижима виброблоков и рабочую скорость ДСП. Мониторинг этих параметров при работе ДСП позволит контролировать техническое состояние (исправность) ДСП, убедиться в правильном выборе режима работы ДСП оператором, и, как следствие, в обеспечении требуемой эффективности стабилизации пути.

Литература:

1. Путьевые машины для выправки железнодорожного пути, уплотнения и стабилизации балластного слоя. Технологические системы: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / А. В. Атаманюк и др.; под ред. М. В. Поповича и В. М. Бугаенко. – М.: Учебно-методический центр по образованию ж.-д. трансп., 2008. – 282с.

2. Bericht der Forschungs- und Versuchabteilung der Fa. Pkasser&Thurer, M12/90.

3. Kish A. Einfluß der Gleisdurcharbeitung auf das Gleisverwerfungspotential; ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 9/2003, p.561-563.

4. ORE, Frage D161 Dynamische Erscheinungen der Wechselwirkung Fahrzeug/Gleis aus der Sicht der Gleisunterhaltung, Bericht Nr. 1, Utrecht, April 1987, p.14.

5. *Grabe P.J., Maree J.S.* Use of a Dynamis Track Stabiliser to Improve Track Maintenance and Optimisation of Track Tamping, RTR Railway Technical Review 4/1997, p.27-32.

СЕКЦИЯ АЭРОДИНАМИКИ И АЭРОУПРОГОСТЬ

ПРОБЛЕМА ПРИМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ СПУТНИКОВ НА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

М.А. Акимов^{1,2}

**¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича**

**Сибирского отделения Российской академии наук
г. Новосибирск, Россия**

**²Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, Россия, akimail@yandex.ru**

Достоинства летательных аппаратов на солнечной энергии очевидны для тропических широт, где солнечное излучение максимально, а световой день составляет 12-14 ч. весь год. Возникает вопрос, существует ли целесообразность применения таких летательных аппаратов в высоких широтах, где интенсивность солнечного излучения в среднем ниже, а зимой световой день сокращается до нескольких часов. В настоящей работе совершена попытка дать ответ на этот вопрос.

The advantages of solar powered aircraft are evident in tropical latitudes, where solar study is maximal and daylight is 12-14 hours. However, the possibility of using such aircraft in high latitudes, where the intensity of solar radiation is lower on average, and in winter daylight hours of only a few hours is not obvious. This work attempts to clarify this.

Для задач обеспечения связи и наблюдения за местностью большой потенциал применения имеют беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Использование солнечной энергии позволяет находиться в воздухе непрерывно вплоть до исчерпания ресурса агрегатов БПЛА. В настоящее время установлен рекорд непрерывного полёта для БПЛА на солнечной энергии: 25 дней 23 часа 57 минут [1]. Полёт проходил летом в июле-августе 2018 г. в штате Аризона (США), расположенном между 33°N и 35°N параллелями. Испытания первого российского БПЛА на солнечной энергии так же проходили летом в июне 2016 г. у г. Орла (52°N...53 °N) продолжительность полёта составила 50 ч, однако, целью проекта не было установление рекорда продолжительности полёта [2].

По понятным причинам проводить исследования и испытания солнечных летательных аппаратов лучше летом и ближе к экватору. Но остаётся не закрытым вопрос: какие перспективы у них есть в высоких широтах 50°-70°.

Выделим два основных фактора препятствующих продолжительному полёту: продолжительность светового дня и скорость ветра. Чтобы лететь в любом направлении, летательному аппарату необходимо развивать скорость больше скорости ветра. Однако, чем больше скорость, тем больше энергопотребление.

Продолжительность светового дня ограничена. Средняя удельная мощность нормального солнечного излучения на единицу площади ограничена и убывает с ростом широты от 300...350 Вт/м² на экваторе, до практически нуля 10...20 Вт/м² на полюсах. Среднегодовые ветра по высоте колеблются от 10 до 40 м/с ($\approx 40 \dots 150$ км/ч).

Исходя из потребных и располагаемых мощностей, можно оценить максимальную допустимую скорость, обеспечивающую круглосуточный полёт:

$$V_{\text{cru}} \leq \sqrt[3]{\frac{2I_{SI}\eta_{SPE}K_{\text{cru}}\eta_{PE}\bar{t}_{DH}}{c_{y_a,\text{cru}}\rho}},$$

где V_{cru} – скорость горизонтального полёта (cruise speed), м/с; I_{SI} – средняя удельная мощность солнечного излучения (solar irradiation), Вт/м²; η_{SPE} – КПД солнечных панелей (solar panel efficiency); \bar{t}_{DH} – относительная продолжительность светового дня (daylight hours); K_{cru} – аэродинамическое качество в горизонтальном полёте (cruise lift to drag ratio); c_{y_a} – коэффициент подъёмной силы самолёта в горизонтальном полёте (cruise lift coefficient); η_{PE} – КПД воздушного винта (propeller efficiency); ρ – плотность воздуха на высоте полёта, кг/м³.

Для некоторых вероятных технических параметров системы можно построить график зависимости скорости полёта от средней удельной мощности солнечного излучения и продолжительности светового дня (см. рисунок). Скорость полёта определяется среднесуточной мощностью поглощённого солнечного излучения. Можно видеть, что даже в высоких широтах при низком уровне солнечного излучения и короткой продолжительности светового дня остаётся шанс для использования атмосферных спутников на солнечной энергии, однако максимальная скорость установившегося горизонтального полёта существе ограничена. Низкие скорости полёта 10-15 м/с осложняют задачу нахождения в районе применения атмосферного спутника, поскольку скорости ветра на высотах свыше 5 000 м ветра могут достигать 20-40 м/с более. Противодействие ветру сводится к увеличению скорости полёта за счёт снижение высоты (разгон в пикировании).

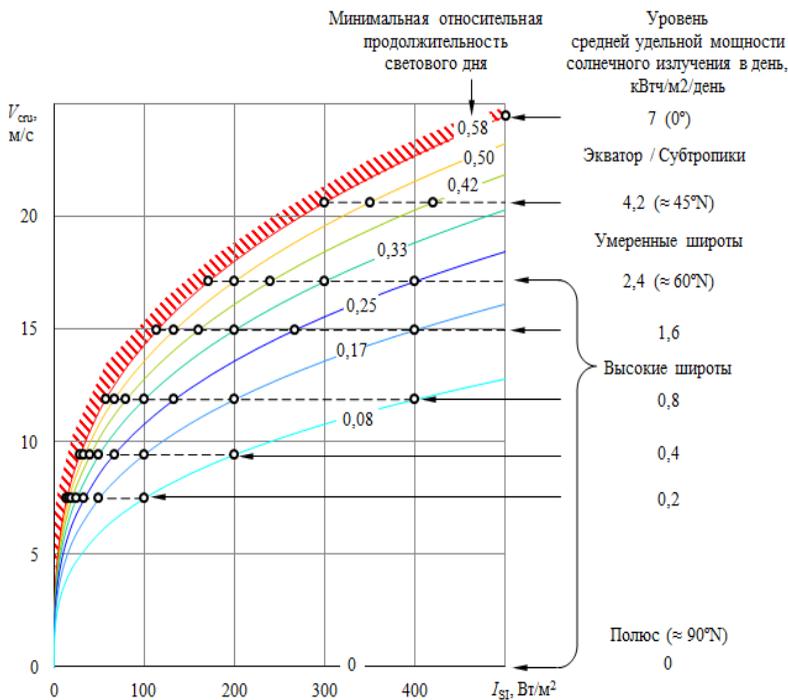


Рис. – Оценка максимальной допустимой скорости полёта от продолжительности светового дня и средней удельной мощности излучения. Мощность излучения [3]

Предварительные оценки явно указывает на необходимость применения дополнительных приёмов управления атмосферным спутником для длительного (непрерывного) полёта. В частности, вместо установившегося полёта, необходимо рассмотреть динамическое парение. Как следует, например, из работ [4, 5] динамическое парение в вертикальном градиенте ветра позволяет сберечь запасённую энергию в аккумуляторах атмосферного спутника. Так же возможны варианты повышения эффективности стационарного парения в вертикальном градиенте ветра. Как показано в работе [6] и последующих, система из двух соединённых длинным тросом самолётов могут сохранять установившийся горизонтальный полёт без маневрирования при наличии вертикального сдвига ветра.

Таким образом, полёт в высоких широтах 50°-70° для атмосферного спутника на солнечной энергии возможен со скоростями 10-15 м/с. Про-

тивом действовать ветрам в 15-40 м/с можно за счёт динамического парения и конструктивных решений, вроде соединения вместе двух летательных аппарата тросом.

Литература:

1. Airbus: «Airbus Zephyr Solar High Altitude Pseudo-Satellite flies for longer than any other aircraft during its successful maiden flight» // Интернет ресурс URL: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/08/> (Дата обращения 27.01.2020)
2. «СОВА. Первый российский атмосферный спутник» // Интернет ресурс URL: <https://fpi.gov.ru/projects/informatsionnye-issledovaniya/sova/> (Дата обращения 27.01.2020)
3. Global Solar Atlas <https://globalsolaratlas.info/map>
4. Noth, R. Siegwart, W. Engel «Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight», 2006
5. G. C. Bower «December 2011 «Boundary layer dynamic soaring for autonomous aircraft: design and validation», 2011
6. Engblom W. Dual-Aircraft Atmospheric Platform // U.S. Patent Application No. 13/414,451, March 17, 2012.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА ТРАПЕЦЕВИДНОЙ МОДЕЛИ БПЛА

А.В. Быков^{1,2}, А.М. Павленко², Б.Ю. Занин²

¹ Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, bykov.4nton@yandex.ru

² Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

В публикации представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния турбулентного следа на обтекание модели беспилотного летательного аппарата. Исследования проводились в дозвуковой аэродинамической трубе при низких числах Рейнольдса. Методы термоанемометрических и пневмометрических измерений являлись основными для получения численных данных. В качестве источника возмущений использовалась ворсистая нить. Полученные результаты показали существенное влияние турбулентного следа на обтекание модели.

The article presents the results of the experimental investigation aimed at studying the effect of a turbulent wake on the flow around a model of an unmanned aerial vehicle. The studies were carried out in a subsonic wind tunnel at low Reynolds numbers. Hot-wire and pneumometric measurements were the main methods for obtaining

numerical data. The thread was used as the source of disturbances. The results obtained showed a significant influence of the turbulent wake on the flow around the model.

На сегодняшний день изучению ламинарно-турбулентного перехода заслуженно уделяется большое внимание. Данная работа является продолжением цикла исследований, посвящённых изучению влияния турбулентного следа на обтекание. В трудах [1], [2] представлены результаты предыдущих работ.

Исследование велось в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН. Размеры рабочей части данной установки составляют $1000 \times 1000 \times 4000$ мм. Величина турбулентности невозмущенного потока меньше 0.04%. В серии экспериментов использовалась трапецевидная модель (рис. 1). На модели измерялось распределение статического давления, а также были получены результаты термоанемометрических измерений. С целью устранить влияние приемников давления на поток, два этих вида измерений выполнялись на равных удалениях от среднего профиля, а именно на расстоянии $\frac{1}{4}$ размаха (рис.1, 1, 2). Скорость набегающего потока составляла $U_\infty=15$ м/с, угол атаки равнялся $\alpha=18^\circ$. Была использована ворсистая нить в качестве источника возмущения, её средний диаметр равнялся 1.5 мм. Нить закреплялась на удалении от носика модели равном 95 мм (если $\alpha=0^\circ$).

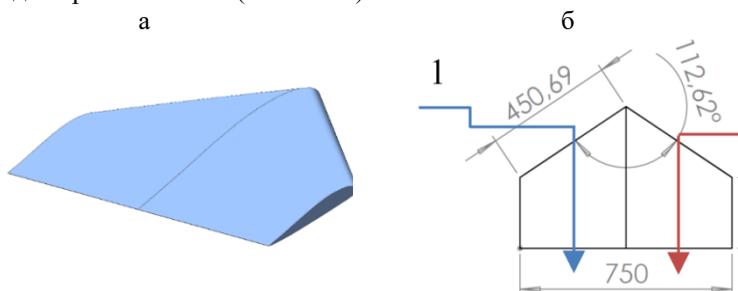
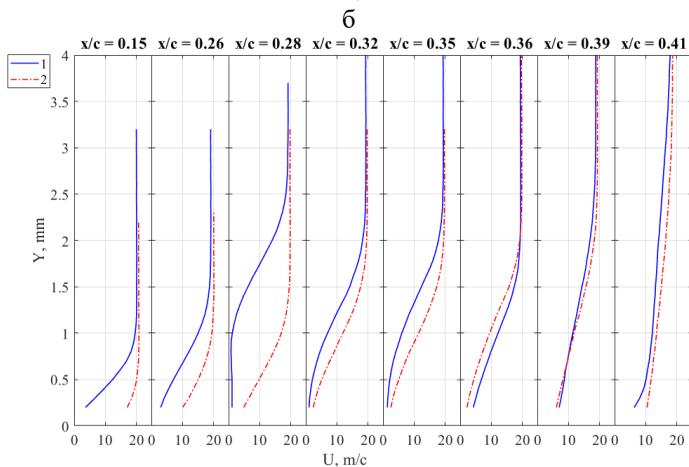
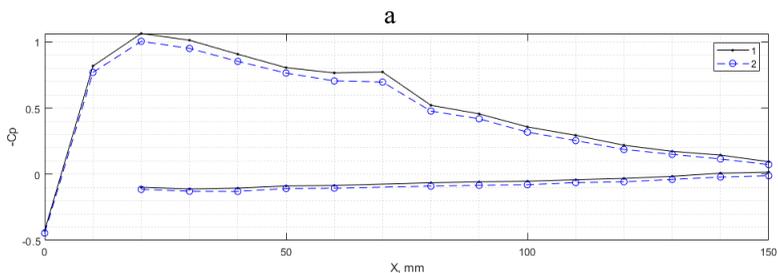


Рис. 1 – Модель БПЛА (а) и ее геометрические размеры (б); 1 – направление термоанемометрических измерений, 2 – распределение приемников давления

Перейдем к полученным результатам. Ниже представлены график, иллюстрирующий распределение коэффициента давления C_p вдоль хорды (рис.2, а). Представленный результат говорит о незначительном влиянии источника возмущения на распределение статического давления. Давление над верхней и нижней увеличилось. Результаты термоанемометрии, напротив, показали существенное влияние турбулентного следа

на обтекание (рис.2, б). Графики распределения скоростей в пограничном слое при свободном набегающем потоке указывает на наличие отрыва при $x/c = 0.26$. Дальнейшее обтекание становится присоединенным и сохраняется до задней кромки. При попадании модели в турбулентный след характер распределения скоростей изменился, присоединенное обтекание наблюдается на всей области измерений. Далее представлена диаграмма распределений пульсаций в пограничном слое (рис.2, в). Диаграмма показала уменьшение пульсаций при попадании модели в след.



в

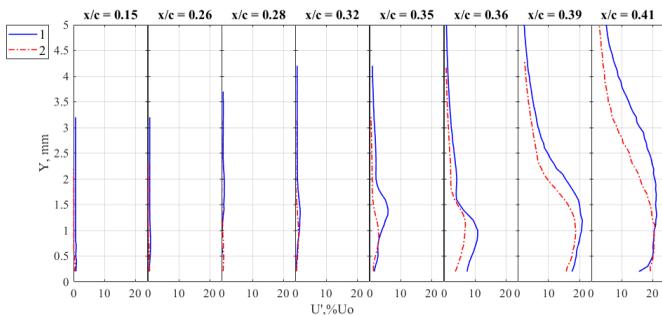


Рис. 2 – Результаты измерений; а – эпюра коэффициента давления, б – распределение средних скоростей в пограничном слое, в – распределение пульсаций в пограничном слое; 1 – свободный поток; 2 – возмущенный поток

Литература:

1. Pavlenko A.M., Bykov A.V., Zanin B.Yu. Experimental study of the effect of external disturbances to flow around the wing model with a swept leading edge // AIP Conference Proceedings : High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM–2019): Proceedings of the XXVI Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter, dedicated to the 150th anniversary of the birth of S.A. Chaplygin (Novosibirsk, 3–5 Apr. 2019). –S.I.: AIP Publishing, 2019. –Vol. 2125 No. 030045(6). DOI: 10.1063/1.5117427
2. Pavlenko A.M., Zanin B.Yu., Bykov A.V., Katasonov M.M. Flow around the wing models with straight and swept leading edge in case of contact with turbulent wake // Journal of Physics: Conference Series : XXXV Siberian Thermophysical Seminar (Novosibirsk, 27-29 Aug. 2019). –S.I.: IOP Publishing, 2019. –Vol. 1382. –P. 012030(6). DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012030

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НА ОРБИТЕ СПУТНИКА CubeSat

А.В. Кашковский², А.А. Королёв¹

¹Новосибирский Государственный Технический Университет,
г. Новосибирск, koroleval97@mail.ru

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича

Так как в настоящее время на низкую околоземную орбиту выводится большое количество спутников типа CubeSat, это увеличивает вероятность их столкновения с большими спутниками. Поэтому имеется интерес к определению

нию времени жизни спутника на орбите при разных параметрах, таких как масса спутника, высоты, времени года, наклона орбиты и т. д.

Since a large number of CubeSat-type satellites are currently being placed in low-earth orbit, this increases the likelihood of them colliding with large satellites. Therefore, there is interest in determining the lifetime of a satellite in orbit for different parameters, such as the mass of the satellite, altitude, time of year, orbital inclination, etc.

Термином CubeSat обозначаются малые космические аппараты (МКА) наноспутники определенного конструктива, созданного в университете Стэнфорда. Размер базового элемента конструкции спутника $10 \times 10 \times 10$ см³. Стандарт допускает объединение двух и более стандартных кубов в составе одного спутника (обозначаются 2U, 3U и т. д.).

За счёт стандартизации размеров и массы стоимость запуска таких спутников намного ниже, чем «больших» спутников. Это приводит к увеличению количества спутников на низких орбитах и повышению вероятности их столкновения с другими объектами в космосе.

Уменьшению количества спутников на орбите будет способствовать ограничение времени жизни спутников на орбите. Это можно осуществить заданием определённой орбиты и времени запуска. Но для этого нужно уметь определять время жизни спутника для разных орбит и состояния атмосферы в зависимости от времени года и солнечной активности.

Для достижения поставленной задачи разрабатывается программа моделирования трёхмерного движения спутника по Кеплеровой орбите. Принято, что на спутник воздействуют только сила гравитационного притяжения Земли и атмосфера. Форма Земли рассматривается в виде эллипсоида в соответствии с ГСК-2011. Используется стандартная атмосфера msis 2000, которая позволяет получать параметры для заданных долготы, широты, высоты, солнечной активности, времени года и суток. Поскольку размер спутника достаточно мал, на высотах более 130 км его движение происходит в свободномолекулярном режиме, что упрощает получение аэродинамических характеристик.

Литература:

1. Аксёнов Е. П. Теория движения искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1977, – 360 стр.

2. Ковтушенко В. М., Камеко В. Ф., Яскевич Э. П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. – Киев: Наук. думка, 1977, - 156 с.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВХОДНОГО КОНФУЗОРА НА ПОДЪЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЧЕЙКИ МУЛЬТИРОТОРНОЙ ПЛАТФОРМЫ

В.В. Куликов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, asmodey3598@yandex.ru**

В данной статье рассмотрена методика оценки прироста тяги, создаваемого 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.

The article discusses the methodology for assessing the increase in thrust of the performed inlet confuser, considers the main solutions for finding the optimum between the confuser size and its weight, and also considers the main solutions for reducing the thrust and methods of dealing with them. Various confuser configurations and their advantages and disadvantages are analyzed.

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

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

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

В работе сравниваются 4 конфигурации конфузуров (рис. 1), создаваемый ими прирост тяги как в теоретической основе, так и в практическом исследовании.

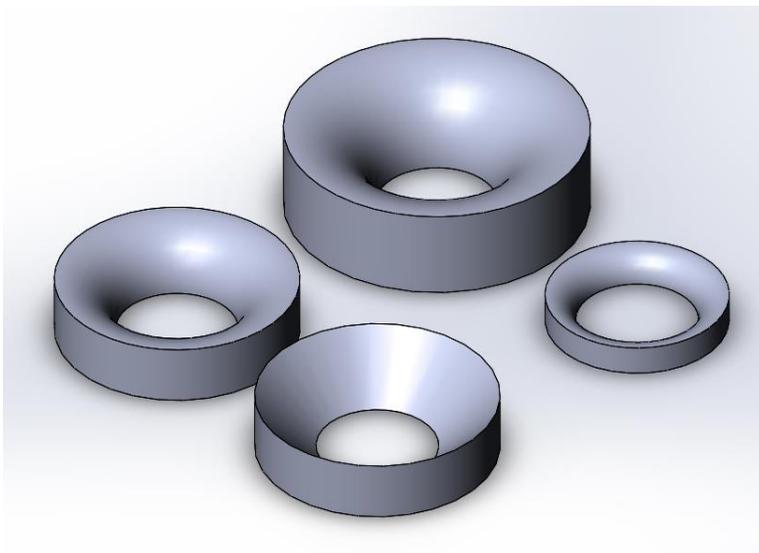


Рис. 1 – Модели конфузоров

Прирост тяги будет представлять собой следующее отношение сил (рис. 2):

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

Здесь

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

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

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

$F_{\Sigma i}$ – прирост силы, создаваемый конфузором;

S_k и v_k – площадь и скорость в самой узкой части конфузора соответственно;

F_k – тяга, создаваемая винтами;

ΔS – площадь кольца действия силы;

γ – угол между проекциями статического давления;

η и $N_{мех.}$ – КПД винта и механическая мощность соответственно.

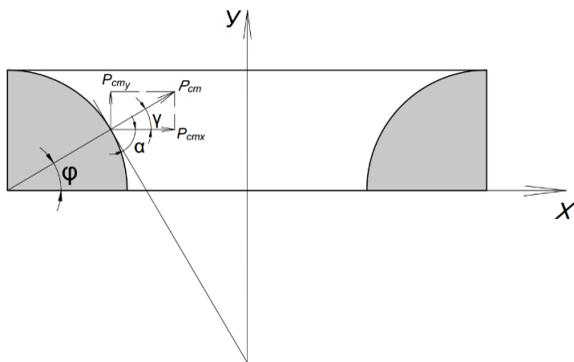


Рис. 2 – Действие статического давления на поверхность конфузора
 Результаты расчета по данной математической модели сведены в таблицу 1. Как видно из таблицы, с ростом размера конфузора, растет и прирост тяги, создаваемой конфузуром.

Таблица 1 – Теоретический прирост тяги

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

Результаты эксперимента и сравнение их с теоретической моделью приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Прирост тяги по теории и в экспериментах

Конфузор	Теоретический прирост тяги, %	Экспериментальный прирост тяги, %
Круглый, радиус образующей $0,5r$	23	6,47
Круглый, радиус образующей $1r$	31	7,50
Круглый, радиус образующей $1,5r$	34	8,27
Конический с шириной основания 115 мм	38	5,27

¹ r — радиус в сечении винтов (критическом сечении).

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

- донным давлением, создаваемым неоднородностью потока;
- неоптимальной геометрией винта;
- иной картиной изолиний;
- другой картиной распределения давления на поверхности.

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

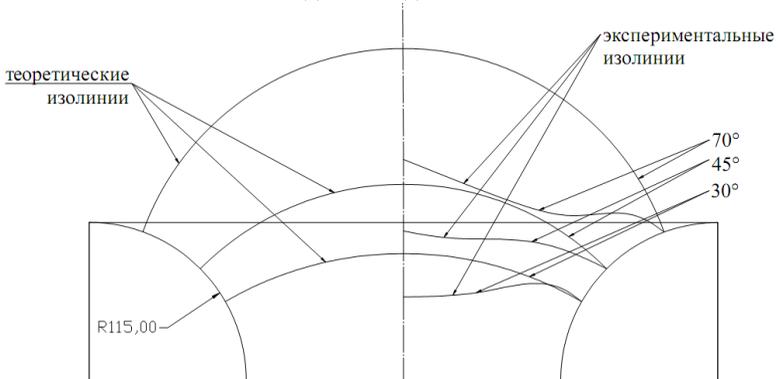


Рис. 2 – Теоретическая и экспериментальная картины изолиний давления

По результатам проведенных экспериментов было установлено распределение давления по поверхности конфузора (рис. 3).

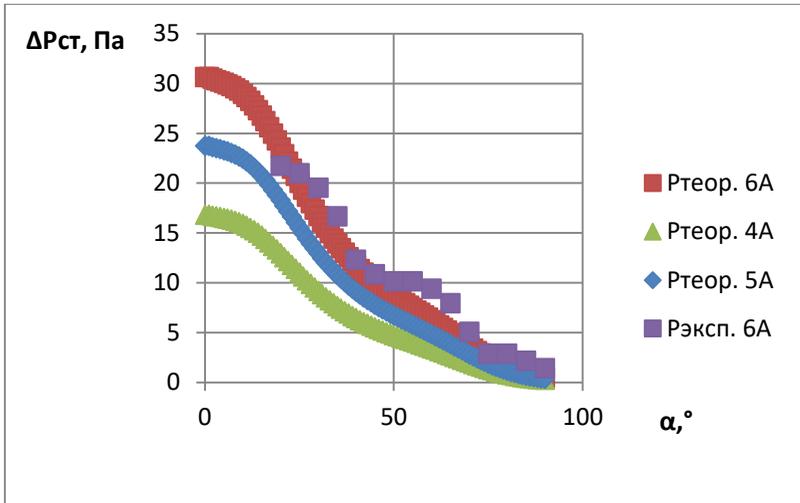


Рис. 3 – Распределение давления по поверхности конфузора для разных значений тока

Литература:

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МНОГОБЛОЧНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ СЕТКИ

Д.П. Полевщиков^{1,2}, А.В. Кашковский²

¹ Новосибирский государственный технический университет

² Институт теоретической и прикладной механики

им. С.А. Христиановича СО РАН², г. Новосибирск,

dpp1997@rambler.ru

Представлена идея автоматизации построения трехмерной многоблочной структурной сетки для решения уравнений Навье-Стокса для простейших моделей летательных аппаратов.

The concept of the automatic generation of volume structured multiblock mesh for obtaining the solution of Navier-Stocks equation for simplified aircraft.

Многоблочные регулярные сетки имеют ряд преимуществ, по сравнению с неструктурированными сетками с тетраэдральными ячейками. В частности, они позволяют значительно сгустить ячейки к поверхности летательного аппарата (ЛА), что важно для корректного разрешения пограничного слоя. Существует множество современных продуктов и пакетов программ для построения подобных сеток, но их создание по-прежнему является нетривиальной задачей и требует от пользователей наличия соответствующих навыков. На данный момент существуют программы для автоматического построения двумерной сетки и деления её на блоки [1], также разработаны методики по автоматическому построению трехмерной структурированной сетки для вертолета [2] и различных моделей ракет [3]. Таким образом, автоматическое построение трехмерной, многоблочной сетки вокруг модели ЛА является востребованной и актуальной задачей.

Основой для автоматического построения сетки является триангулированная поверхность модели ЛА. При этом в модели могут быть «некорректности»: дырки, не стыкующиеся или вырожденные треугольники и пр. Программа должна провести анализ модели, и выделить базовые элементы (фюзеляж, крыло, рули направления и высоты, пилон и т.д.), для которых разработаны алгоритмы построения блоков сетки, комбинация которых и даст искомую сетку.

Предлагается идея построения трехмерной многоблочной структурированной сетки вблизи тривиальной модели летательного аппарата (ЛА) для дальнейшего решения уравнений Навье-Стокса с помощью программного модуля по автоматизации построения сетки и передачи данных между её блоками посредством протокола MPI, который на

данный момент находится в стадии разработки. Пример рассматриваемого летательного аппарата приведен на рис. 1.

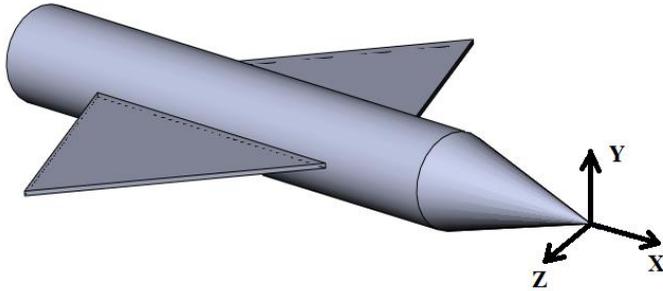


Рис. 1 – Пример тривиальной модели летательного аппарата

Анализ разделения модели на базовые элементы делается на основе изменения площади и момента инерции сечения контура, образованного пересечением секущей плоскости с поверхностью модели вдоль координатной оси. Скачкообразное изменение площади, момента инерции и их соотношения является границей между элементами. Рассмотрим плоскость, перпендикулярную оси OX . Начиная в вершине конуса и двигаясь в сторону хвостовой части ЛА видим, что момент инерции относительно оси OX I_x увеличивается с увеличением радиуса сечения конуса. В тот момент, когда I_x перестает расти, можно утверждать, что последнее сечение, в котором момент инерции I_x изменялся, соответствует границе носовой части ЛА и фюзеляжа. При дальнейшем движении плоскости сечения I_x увеличивается – в исследуемом сечении обнаружены точки соединения крыла и фюзеляжа. В конце данного движения плоскости будет наблюдаться резкое уменьшение I_x , что свидетельствует о конце фюзеляжа ЛА. Таким образом, при анализе всех трех проекций ЛА определяются границы элементов конструкции рассматриваемого ЛА.

Для носовой части (конуса) определяются габаритные точки, являющиеся пересечением координатных осей (точки P8, P12, P16 на рис. 2). Получившийся треугольник является основой для построения блоков (см. рис. 2). Имеется алгоритм для вычисления всех базовых точек по набору исходных параметров (выделены на схеме красным цветом).

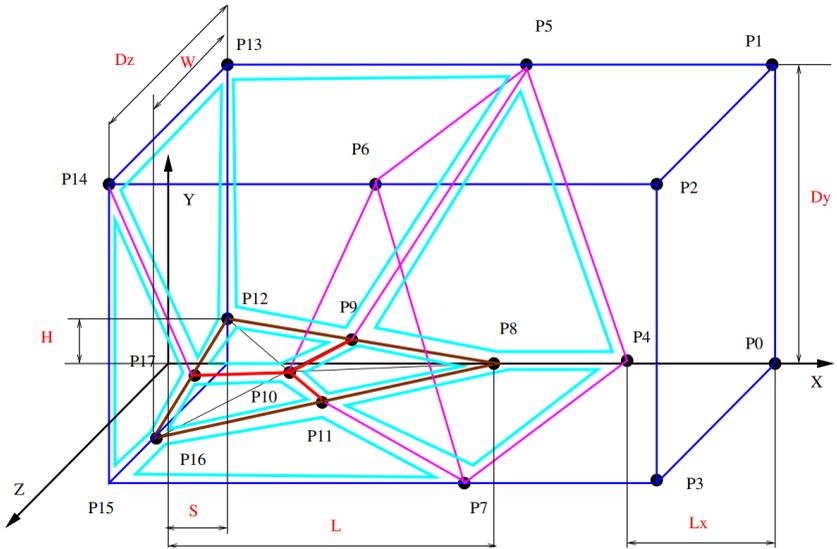


Рис. 2 – Разбиение сетки вблизи треугольника на блоки

Далее, используя уравнение поверхности конуса, определяются точки пересечения граней блоков и конуса, сечением которого является треугольник $P_8P_{12}P_{16}$. Таким образом, получена блочная структура вблизи носовой части рассматриваемого ЛА.

Сегмент расчетной сетки для хвостовой части фюзеляжа представлен на рис. 3.

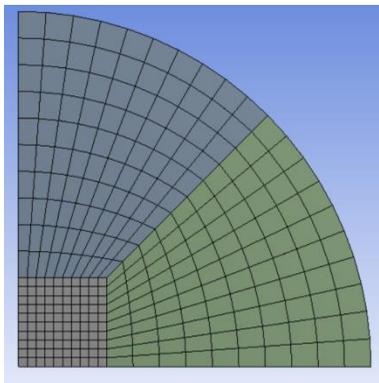


Рис. 3 – Сегмент расчетной сетки хвостовой части фюзеляжа

Рассмотрим построение сетки в области соединения фюзеляжа и крыла. Для всех участков поверхности фюзеляжа, за исключением области присоединения крыла, строится простейшая цилиндрическая расчетная сетка. Построение сетки для области соединения фюзеляжа и крыла заключается в построении сетки для крыла, после чего строится сетка для фюзеляжа, которая огибает сетку крыла, обеспечивая требуемое качество сетки.

В итоге, предполагается, что данная методика позволит разработать программу для автоматического построения трехмерной многоблочной структурированной сетки и организации передачи данных между блоками посредством протокола MPI для решения уравнений Навье-Стокса для тривиальных моделей ЛА.

Литература:

1. Хайруллин А.Ф., Хайрулина О.Б. Автоматическое построение начального приближения блочно-структурированной криволинейной сетки // Вычислительные технологии. 2002, Т. 7, № 5, С 96 – 107.
2. Allen C. Automatic structured multiblock mesh generation using robust transfinite interpolation. Proceedings of 18th AIAA computational fluid dynamics conference. Miami, Florida, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2007. p. 1–22.
3. Pandya S, Chan W, Kless J. Automation of structured overset mesh generation for rocket geometries. Proceedings of 19th AIAA computational fluid dynamics. San Antonio, Texas, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference; 2009. p. 1–19.

РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕР СГОРАНИЯ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГАЗОПРИХОДА И ПРОГРЕВА КОНСТРУКЦИИ

М.С. Серeda, А.В. Червакова, К.В. Костюшин
Томский государственный университет, г. Томск,
mihailsereda@mail.ru

Разработана программа, позволяющая проводить расчеты параметров течения продуктов сгорания в проточных трактах РДТТ и температурного поля в стенке с учетом нестационарного газоприхода с поверхности горения. Расчет течения продуктов сгорания базируется на методике Годунова с использованием подвижной пространственной дискретной сетки. Распределение температурного поля в стенке двигателя рассчитывается путем решения уравнения теплопроводности конечно-разностным методом.

A program has been developed that allows calculating the parameters of the flow of combustion products in the flow paths of solid-fuel rocket engines and the temperature field in the wall, taking into account the non-stationary gas intake from the combustion with the burning surface. The calculation of the flow of combustion products is based on the Godunov method using a mobile spatial discrete grid. The distribution of the temperature field in the engine wall is calculated by solving the thermal conductivity equation using the finite-difference method.

Неотъемлемой частью начальных этапов разработки ракетных двигателей является математическое моделирование и исследование процессов горения топлива и течения продуктов сгорания в проточных трактах.

Течение продуктов сгорания в проточных трактах РДТТ описывается системой уравнений Эйлера [1]. Расчет производится с использованием схемы С.К. Годунова для подвижной пространственной дискретной сетки (1-4):

$$\frac{(\rho G)_i^{k+1} - (\rho G)_i^k}{\Delta t} + \sum_{j=1}^{m(i)} R_j \left([\mathbf{V} - \mathbf{D}] \cdot \mathbf{S}^{k+1/2} \right)_j = 0, \quad (1)$$

$$\frac{(\rho v G)_i^{k+1} - (\rho v G)_i^k}{\Delta t} + \sum_{j=1}^{m(i)} (R V)_j \left([\mathbf{V} - \mathbf{D}] \cdot \mathbf{S}^{k+1/2} \right)_j + \sum_{j=1}^{m(i)} P_j \mathbf{S}_j^{k+1/2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{(e G)_i^{k+1} - (e G)_i^k}{\Delta t} + \sum_{j=1}^{m(i)} E_j \left([\mathbf{V} - \mathbf{D}] \cdot \mathbf{S}^{k+1/2} \right)_j + \sum_{j=1}^{m(i)} P_j \mathbf{S}_j^{k+1/2} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{G_i^{k+1} - G_i^k}{\Delta t} - \sum_{j=1}^{m(i)} \left(\mathbf{D} \cdot \mathbf{S}^{k+1/2} \right)_j = 0. \quad (4)$$

Здесь p , ρ , v , e – давление, плотность, скорость и энергия в центре дискретной ячейки, P , R , V , E – давление, плотность, скорость и энергия на центре грани дискретной ячейки соответственно, G – объем дискретной ячейки, S – площадь рассматриваемой грани ячейки.

Скорость горения заряда твердого топлива определяется по степенному закону горения (5), что позволяет производить расчет координаты x подвижных граней по формуле (6):

$$u = u_0 p_i^v, \quad (5)$$

$$x^{k+1} = x^k + nuDt, \quad (6)$$

где u – скорость горения, u_0, v – константы в законе скорости горения, p_i – давление в ячейке, n – вектор внешней нормали к грани ячейки.

Нагрев стенки двигателя описывается уравнением теплопроводности (7) с граничными и начальными условиями (9-10) [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (7)$$

$$\alpha(T_c - T_{c.g.}) + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{c.g.} = 0, \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{c.n.} = 0, \quad (9)$$

$$T(y; 0) = T_n, \quad (10)$$

где y – координата по толщине стенки, λ – коэффициент теплопроводности стенки, c – изобарная теплоемкость, γ – плотность, α – коэффициент теплоотдачи газа.

Расчет нестационарной теплопроводности проводится с использованием метода конечных разностей. Уравнение теплопроводности принимает вид:

$$T_{n,k+1} - T_{n,k} = a \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} (T_{n+1,k} + T_{n-1,k} - 2T_{n,k}). \quad (11)$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности стенки.

В данной работе рассматривается твердотопливный ракетный двигатель с зарядом торцевого горения и присоединенным радиусно-коническим сопловым блоком (рис. 1). В качестве свода горения рассматривается торцевая сторона цилиндрического заряда, боковые поверхности не воспламеняются.



Рис. 1 – Схематическая модель камеры сгорания и соплового блока РДТТ

С помощью разработанного программного комплекса были проведены тестовые расчеты течения газа в проточном тракте РДТТ с учетом изменения геометрии заряда твердого топлива.

В качестве наполнителя рассматривалось типовое ракетное топливо с характерными ему показателем адиабаты $n = 1.13$ и молекулярной массой $\mu = 1.13$ [3]. В качестве материала стенки рассматривалась сталь марки X18H9T, толщина стенки составила $y = 5$ мм.

На рис. 2 представлен график распределения давления по длине проточного тракта РДТТ в различные моменты времени. На рис. 3 показан график зависимости кривой давления в камере от времени. В течении 4 секунд происходит установление давления в двигателе, далее двигатель выходит на рабочий режим.

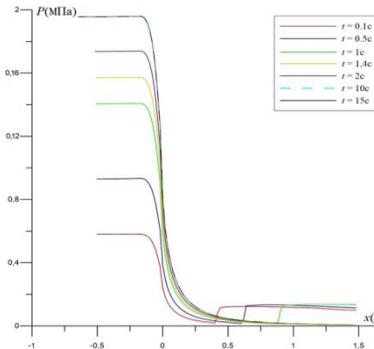


Рис. 2 – Распределение давления по проточному тракту РДТТ

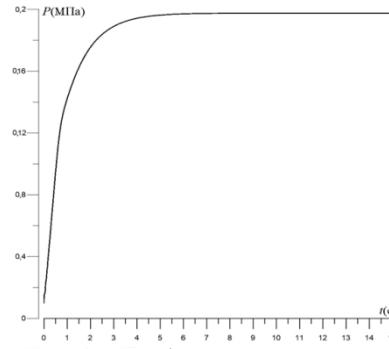


Рис. 3 – График зависимости давления в камере сгорания от времени

На рис. 4 показано распределение температуры для различных моментов времени в стенке ракетного двигателя. На рис. 5 показано изменение температуры на внутренней и внешней поверхностях стенки. Видно, что на внутренней поверхности температура в начальный момент времени резко возрастает, далее интенсивность роста спадает. Температура наружных слоев продолжает постепенно возрастать.

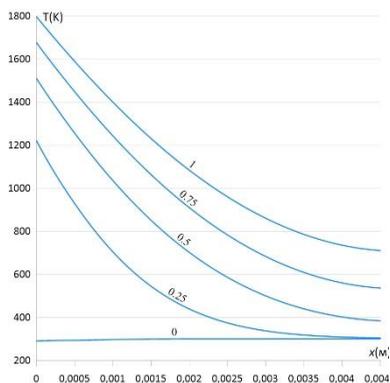


Рис. 4 – Распределение температуры в стенке двигателя

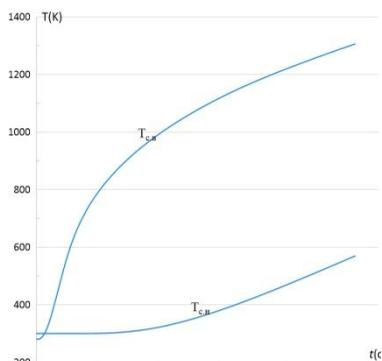


Рис. 5 – Изменение температуры на внутренней и внешней поверхностях

Разработанный программный комплекс может использоваться при проектировании РДТТ для анализа газодинамических параметров с учетом выгорания наполнителя и прогрева конструкции.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

Литература:

1. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики: учебное пособие / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др.; под ред. С. К. Годунова. – М.: Наука, 1976. –400 с.: ил.
2. Орлов Б. В. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе / Б. В. Орлов, Г. Ю. Мазинг. – М.: Машиностроение, 1968. – 536 с.
3. Алемасов В. Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов высших технических учебных заведений / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин. – М.: Машиностроение, 1989. –464 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ БОРА В ОТРАЖЁННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ

А.А. Сыроватень

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, verlovaalex@gmail.com

В настоящей работе представлены математическая модель и постановка задачи моделирования скоростной релаксации и горения микрочастиц бора в отраженной ударной волне. Моделирование осуществляется на основе расширенной PSU-модели. Рассмотрены стадии воспламенения и горения частиц бора, эти процессы описаны дифференциальными уравнениями.

In this work, we present a mathematical model and the formulation of the problem of modeling the rate relaxation and combustion of boron microparticles in a reflected wave. The simulation is based on the extended PSU model. The stages of ignition and combustion of boron particles are considered; these processes are described by differential equations.

На сегодняшний день перспективными добавками для горючей смеси в ракетно-прямоточных двигателях на твердом топливе являются бор и его соединения. Связано это с высоким тепловым эффектом и температурой сгорания бора.

При нормальных условиях частица бора радиусом 1-50 мкм покрыта тонким оксидным слоем – B_2O_3 , толщина которого составляет 0.02–0.03 мкм. Температура плавления оксидного слоя – 723 К. Температура плавления бора – 2450 К. Наличие оксидного слоя на поверхности частицы, температура плавления которого намного ниже температуры плавления чистого бора, выделяет частицы бора по сравнению с остальными высокоэнтальпийными добавками и приводит к некоторым уникальным свойствам.

Основные постулаты теории воспламенения частиц бора получены благодаря исследованиям, выполненным в [1] Мацеком и Семплом в 1969 году. В статье [1] представлено всестороннее исследование воспламенения кристаллического бора в постпламенной зоне горелки с плоским пламенем. Этот метод позволил определить скорость частицы при воспламенении, задержку воспламенения и общее время горения частиц бора. Обнаружено несколько характерных особенностей воспламенения частиц бора: 1) Температура зажигания всегда четко определена. 2) Структура пламени горячей частицы бора состоит из трех зон: яркое центральное ядро, прилизительно равное диаметру частицы; более широкая, симметричная, несколько менее светящаяся зона шириной от 300 до 400 мкм; и зона зеленой огибающей шириной до 1 см. 3) Двухстадийность процесса. На первом этапе происходит

воспламенение, частица горит ярко, а затем начинает затухать. На втором этапе она снова зажигается и горит ярче, чем ранее.

В статье Йех и Куо 1997 года [2], условия воспламенения были получены при сжигании смеси, состоящей из метана, кислорода и азота. На основе проведенного эксперимента и рентгенофазного анализа была построена математическая модель воспламенения частиц бора, которая в дальнейшем получила название – PSU-модель. В данной модели считается, что процесс горения частицы бора состоит из двух стадий. Первый этап – воспламенение, в результате которого происходит удаление оксидного слоя с поверхности. На втором этапе горит частица «чистого» бора. PSU-модель включает реакции бора с O₂, водяным паром, фтористым водородом и атомарным фтором. В данной работе учитываются только реакции с кислородом.

В 2010 году немецкие ученые опубликовали статью [3], в которой был произведен тщательный анализ PSU-модели. Были выявлены некоторые несоответствия, ошибки и недостатки, которые привели к появлению новой модели, которая включает последовательную формулировку процессов теплопереноса на основе квазистационарного подхода, учитывает испарение бора, а также учитывает влияние конвекции. Скорости химической реакции, принятые в PSU-модели, были пересмотрены и немного изменены, дифференциальные уравнения, которые должны быть решены, исправлены и введен алгоритм итерационного решения.

Целью данной работы является разработка вычислительного алгоритма для расчета воспламенения и горения частиц бора в отраженной ударной волне, основанного на расширенной PSU-модели горения частиц бора.

В данной работе предлагается следующая постановка задачи. На покоящуюся частицу набегают проходящая ударная волна, затем волна отражается от стенки и в отраженной ударной волне происходит воспламенение частицы бора.

Начальные параметры: скорость частицы – 0 м/с; температура частицы – 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 на поверхности частицы задаются в зависимости от условий задачи.

Математическое моделирование поставленной задачи предполагает численное решение системы из шести дифференциальных уравнений: координаты, скорости, радиуса, толщины оксидного слоя, температуры частицы и доли расплавленного бора.

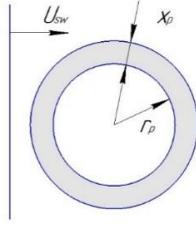


Рис. 1 – Схема моделирования

Первая стадия горения:

$$\frac{dx}{dt} = U; \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{F}{m} = \frac{C_d \cdot \rho \cdot w^2 \cdot S}{2 \cdot m}, \quad (2)$$

где x и U – координата и скорость частицы, соответственно, w – скорость частицы относительно газа, S – площадь поперечного сечения частицы, C_d – коэффициент сопротивления, m – масса частицы, ρ – плотность частицы.

$$\frac{dr_p}{dt} = - \frac{\left[((-v_{B,B2O3} \cdot M_B \cdot R_{B2O3}) + (-v_{B,O2} \cdot M_B \cdot R_{O2})) + \frac{r_p}{3} \cdot \left(\frac{d\rho_{B,s}}{dT_p} \cdot \frac{dT_p}{dt} \right) \right]}{\rho_{B,s}}, \quad (3)$$

где r_p – радиус частицы без оксидного слоя, v – стехиометрический коэффициент, M – молярная масса, T_p – температура частицы, R – скорость химических реакций.

$$\frac{dx_p}{dt} = - \frac{\left[(-v_{B2O3,B}) \cdot M_{B2O3} \cdot R_B + x_p \cdot \left(\frac{d\rho_{B2O3,l}}{dT_p} \cdot \frac{dT_p}{dt} \right) \right]}{\rho_{B2O3,l}} \quad (4)$$

где x_p – толщина оксидного слоя.

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\left[h_c \cdot (T_\infty - T_p) + \sigma \cdot \varepsilon_{B2O3} \cdot (T_w^4 - T_p^4) + \rho_{B,s} \frac{r_p}{3} \cdot C_{p,B} + \rho_{B2O3,l} \cdot x_p \cdot C_{p,B2O3} \right]}{\rho_B \frac{r_p}{3} \cdot C_{p,B} + \rho_{B2O3,l} \cdot x_p \cdot C_{p,B2O3}} + \left(\left(R_{B2O3} \cdot \left[\sum_{i=1}^{K_g + \{B_{(s)}, B2O3_{(l)}\}} (-v_{iB2O3}) \cdot H_i(T_p) \right] \right) + \left(R_{O2} \cdot \left[\sum_{i=1}^{K_g + \{B_{(s)}, B2O3_{(l)}\}} (-v_{iO2}) \cdot H_i(T_p) \right] \right) \right) \quad (5)$$

где h_c – коэффициент теплопередачи, T_∞ – температура газовой фазы, T_w – температура окружающих стенок, σ – постоянная Стефана-Больцмана, ε – излучательная способность, $H_i(T_p)$ – энтальпия чистого вещества, C_p – удельная теплоемкость.

$$\frac{df}{dt} = 0 \quad (6)$$

Вторая стадия горения: при $T \neq T_m$:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\left[h_c \cdot (T_\infty - T_p) + \sigma \cdot \varepsilon_B \cdot (T_w^4 - T_p^4) + \rho_B \frac{r_p}{3} \cdot C_{p,B} \right]}{\rho_B \frac{r_p}{3} \cdot C_{p,B}} + \left(\frac{R_{O2}}{v_{B,O2}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{K_{gas} + \{B_{(l)}\}} (-v_{iO2}) \cdot H_i(T_p) \right] - \dot{m}''_{vap} \cdot \frac{\Delta h_v}{M_B} \right) \quad (7)$$

где \dot{m}''_{vap} – неотрицательный поток массы испаряющегося бора, Δh_v – молярная энтальпия испарения.

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\left[R_{O2} \cdot M_B + \dot{m}''_{vap} + \frac{r_p}{3} \cdot \left(\frac{d\rho_B}{dT_p} \cdot \frac{dT_p}{dt} \right) \right]}{\rho_B} \quad (8)$$

При $T = T_m$:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\left[h_c \cdot (T_\infty - T_p) + \sigma \cdot \varepsilon_B \cdot (T_w^4 - T_p^4) + \frac{R_{O2}}{v_{B,O2}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{K_{gas} + \{B_{(l)}\}} (-v_{iO2}) \cdot H_i(T_m) \right] \right]}{\rho_B \frac{r_p}{3} \cdot \Delta H_{m,B}} \quad (9)$$

где f – доля расплавленного бора.

$$\frac{dr_p}{dt} = - \frac{\left[R_{O_2} \cdot M_B + \dot{m}_{vap}'' \cdot \frac{r_p}{3} \cdot \left(\frac{d\rho_B}{dT_p} \cdot \frac{dT_p}{dt} \right) \right]}{\rho_B} \quad (10)$$

Литература:

1. Macek, A. and Semple, J. M., Combustion Science Technology, 1, 181-191 (1969).
2. Yeh, C. L., Kuo K. K., Ignition and Combustion of Boron Particles. Ph.D. thesis, Pennsylvania State University, (1996).
3. Hussmann B., Pfitzner M, Extended combustion model for single boron particles – Part I: Theory, Combustion and Flame 157 803–821, (2010).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В СОПЛАХ РДТТ С УЧЕТОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

А.В. Червакова, М.С. Серeda, К.В. Костюшин

**Национальный исследовательский Томский государственный
университет, г. Томск, anastasiya.chervakova@stud.tsu.ru**

Разработана методика и алгоритм расчета течений химически неравновесных продуктов сгорания в соплах РДТТ с учетом физико-химических превращений в газовой фазе. На основе разработанного алгоритма реализован программный комплекс. Проведены численные исследования течения реагирующей смеси продуктов сгорания модельного топлива в сопле Лавала.

A method and algorithm for calculating the flows of chemically non-equilibrium combustion products in the nozzles of solid-fuel rocket engines, taking into account physical and chemical transformations in the gas phase, are developed. Based on the developed algorithm, a software package is implemented. Numerical studies of the flow of a reacting mixture of model fuel combustion products in a Laval nozzle are performed.

В ракетно-космической технике широко применяются металлизированные смесевые твердые ракетные топлива [1]. Продуктами сгорания таких топлив является многокомпонентная реагирующая смесь газообразных продуктов сгорания с окислами и частицами металлов. Одним из этапов при анализе энерготяговых характеристик РДТТ является математическое моделирование физико-химических процессов, протекаю-

щих в камере сгорания и сопловом блоке. Целью настоящей работы является разработка методики и алгоритма расчета течений продуктов сгорания в соплах РДТТ с учетом физико-химических превращений в газовой фазе.

С учетом общепринятых допущений [2], течение смеси газов в каналах с пологими стенками можно описать системой уравнений Эйлера в квазиодномерном приближении:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho F + \frac{\partial}{\partial x} \rho u F = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u F + \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho u^2) F = p \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) F + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) + p u \right] F = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho F \alpha_n + \frac{\partial}{\partial x} \rho u F \alpha_n = F W_n, \quad (4)$$

где t – время, x – продольная координата, ρ – плотность, u – скорость, p – давление, ε – внутренняя энергия единицы массы смеси, α_n – мольно-массовые концентрации, W_n – скорость образования n -ого компонента в единице объема в результате химических реакций, $F=F(x)$ – зависимость площади канала от продольной координаты.

Система (1)-(4) замыкается уравнениями состояния компонент смеси, которые в случае совершенной смеси газов имеют вид:

$$p_n = \frac{R_0 \rho_n T}{\mu_n}, \quad p = \frac{R_0 \rho T}{\mu}, \quad p = (\gamma - 1) \rho \varepsilon, \quad (5)$$

где R_0 – универсальная газовая постоянная, μ – молекулярная масса смеси, p_n – парциальное давление компонента смеси, ρ_n – плотность компонента смеси, μ_n – молекулярная масса компонента смеси, γ – показатель адиабаты смеси.

Для численного решения уравнений Эйлера (1)-(4) применяется схема Годунова первого порядка точности [3]:

$$G_i \frac{\rho_i^{k+1} - \rho_i^k}{\Delta t} + \sum_{j=i}^{i+1} (R_j U_j) F_j = 0, \quad (6)$$

$$G_i \frac{(\rho u)_i^{k+1} - (\rho u)_i^k}{\Delta t} + \sum_{j=i}^{i+1} [(R_j U_j^2 + P_j) F_j] = p_i^k \sum_{j=i}^{i+1} F_j, \quad (7)$$

$$G_i \frac{\left[\rho \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right]_i^{k+1} - \left[\rho \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right]_i^k}{\Delta t} + \sum_{j=i}^{i+1} \left\{ \left[R_j U_j \left(E_j + \frac{U^2}{2} \right) \right] + P_j U_j \right\} F_j = 0, \quad (8)$$

$$G_i \frac{(\rho \alpha_n)_i^{k+1} - (\rho \alpha_n)_i^k}{\Delta t} + \sum_{j=i}^{i+1} (R_j U_j A_n) F_j = 0, \quad (9)$$

где G_i – объем расчетной ячейки, $i = 0, 1, \dots, m$ – номер ячейки, F_j – площадь грани ячейки, $j = 0, 1, \dots, (m+1)$ – номер грани.

Так как скорости, давления и термодинамические свойства смеси в соседних ячейках могут быть различны, то в сечении $x = x_j$, реализуется распад разрыва. Изменение физических величин при этом распаде для всех неизвестных будет описываться решением задачи Римана.

При реализации алгоритма предполагается, что в начальный момент времени во всей области течения являются заданными распределения скорости v , давления p , температуры T и химический состав газа α_n . На входе в сопло задаются условия постоянства энтропии S , энтальпии H и химического состава смеси α_n . На выходе из сопла реализуется сверхзвуковое истечение, граничные условия в соответствии с [33] не ставятся.

Газовая постоянная $(R_g)_i^k$ и показатель адиабаты γ_i^k смеси определяются из расчета равновесных параметров состояния СПК «TERRA». Исходными данными для расчета являются значения давления P и температуры T на k -ом шаге по времени в заданном сечении x_i .

На основании вышеизложенной методики расчета и алгоритма разработан программный комплекс на языке программирования C#.

Проведены расчеты основных параметров течения твердого плазмообразующего топлива, используемого в импульсных МГД-генераторах в радиусно-коническом сопле.

Начальные и граничные условия приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Начальные и граничные условия

	Начальные условия	Граничные условия на входе в сопло
Давление P , атм.	1	60
Скорость u , м/с	0	0
Температура T , К	300	3500

На рис. 1 показана зависимость равновесного показателя адиабаты от давления и температуры $\gamma_{равн}=f(p, T)$ рассчитанного с использованием СПК «TERRA» с шагом 5 атм по давлению и 25 К по температуре.

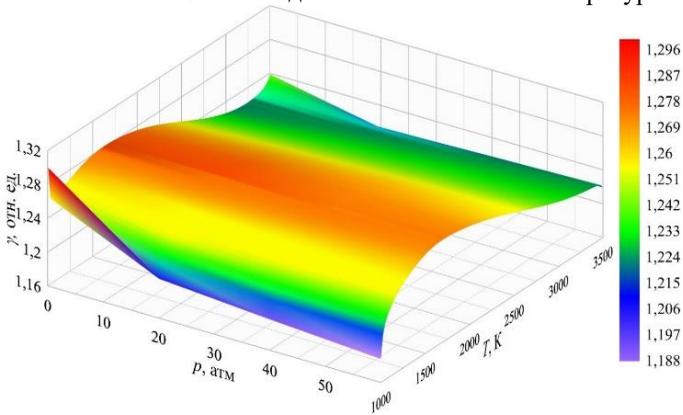


Рис. 1 – Поверхность зависимости показателя адиабаты газовой фазы от давления и температуры

Результаты расчетов показаны на рис. 2 в виде распределения давления продуктов сгорания рассматриваемого топлива по длине сопла при равновесном, равновесно-замороженном и замороженном течениях.

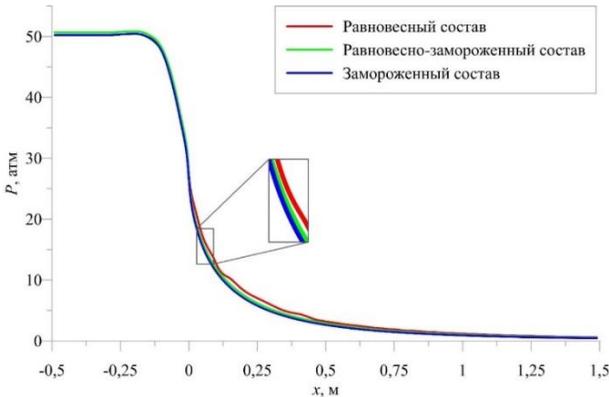


Рис. 2 – Распределение давления смеси продуктов сгорания по длине сопла

Видно, что для многокомпонентной газовой смеси основные различия между равновесным и замороженным потоками наблюдаются в

трансзвуковой части сопла. Это объясняется тем, что при переходе через минимальное сечение в случае равновесного течения в поток вносится дополнительная тепловая энергия в результате протекания экзотермических реакций.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для расчета двухфазных течений в камерах сгорания и сопловых блоках ракетных двигателей с физико-химическими превращениями в газовой фазе и горением частиц конденсированной фазы.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

Литература:

1. Рахматуллин Х. А. Газовая динамика / Х. А. Рахматуллин, А. Я. Сагомоян, А. И. Бунимович, И. Н. Зверев – М.: Высшая школа, 1965. – 722 с.
2. Пирумов У. Г. Течения газа в соплах / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. - М.: Издательство Московского ун-та, 1978. - 351 с.: ил.
3. 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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕВА
И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЗАРЯДОВ РД**

К.Л. Алигасанова, Р.Ю. Бургомистренко

**Национальный исследовательский Томский государственный
университет, г. Томск, aligasanova@gmail.com**

В представленной работе реализована методика расчета прогрева и теплового состояния в цилиндрическом заряде ракетного двигателя на основе метода конечного объема в трехмерной постановке. Проведены численные исследования с различными конфигурациями теплового потока. Полученные распределения температур подтверждают возможность применения разработанного метода для расчета сложных конфигураций зарядов РДТТ.

In the presented work, a method is implemented for calculating the heating and thermal state in a cylindrical charge of a solid propellant rocket engine based on the finite volume method in a three-dimensional formulation. Numerical studies with different heat flow configurations have been carried out. The obtained temperature distributions confirm the possibility of using the developed method for calculating complex configurations of solid propellant rocket charges.

Исследование процессов теплообмена играет весомую роль в развитии техники, строительного дела, химической технологии, металлургии, машиностроения, агротехники, ракетостроения и др. На сегодняшний день существуют множество методов решения нестационарного уравнения теплопроводности. Традиционные методы математической физики дают возможность решать уравнение теплопроводности лишь для частных случаев, когда начальные и граничные условия имеют достаточно простой вид. Для построения математических моделей, адекватных действительному процессу, необходимо принимать во внимание зависимость от температуры теплофизических характеристик материала, изменение формы тела и возможность фазовых превращений. Учет данных факторов приводит к необходимости использовать приближенные методы расчета.

Настоящая работа посвящена методу контрольных объемов [1-3], который отличается универсальностью построения консервативных схем для неравномерных, криволинейных и неструктурированных сеток. Преимуществом данного метода является сохранение основных величин, таких как: энергия системы, масса и тепловые потоки даже в случае грубой расчетной сетки по всей области.

Цель настоящей работы заключается в разработке методики и программы расчета для моделирования трехмерных теплофизических процессов в цилиндрическом заряде ракетного двигателя. Моделирование теплового состояния корпуса и заряда твердого топлива в камере сгорания РДТТ связано с задачей определения распределения тепла в объеме заряда с учетом нестационарного теплообмена с продуктами сгорания и разгара самого заряда.

Математическая постановка задачи заключается в решении уравнения теплопроводности в частных производных второго порядка. Первым этапом в качестве тестовой задачи выбрана расчётная область с известным аналитическим решением, которая представляет собой куб, разбитый на элементарные объёмы в виде тетраэдров. Для куба размерностью $1 \times 1 \times 1$ с заданными граничными условиями известно, что аналитическое решение имеет вид $f = xyz$.

Граничные условия определяются на внешних гранях yz , xz , xy и на гранях пересекающих начало координат. Область решения делится на элементарные объёмы, в пределах которых проводится интегрирование уравнения теплопроводности. Для численного решения разработан вычислительный алгоритм и реализована программа расчёта на языке программирования C#. Сравнение точного аналитического и численного решений в сечении xy при $z = 0.5$ представлено на Рисунке 1. Решения совпадают с точностью до изображения, что подтверждает работоспособность реализованной методики по расчету теплового состояния тел произвольной формы.

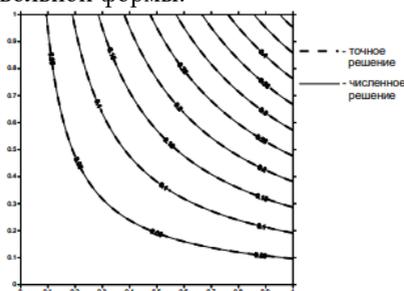


Рис. 1 – Сравнение точного и численного решения

Вторым этапом на основе реализованного алгоритма, проведены численные исследования задачи прогрева модельного цилиндрического заряда с постоянными тепловыми потоками в условиях камеры сгорания. Геометрические размеры заряда: длина заряда – 60 мм, радиус

внешнего цилиндра – 20 мм, радиус внутреннего цилиндра – 10 мм. Начальная температура – 300К.

На боковых поверхностях ГУ1, ГУ3 используются мягкие граничные условия. Предполагается, что поверхность цилиндра ГУ2 теплоизолированная. На внутренней поверхности ГУ4 задан тепловой поток. Физическая постановка задачи представлена на Рисунке 2.

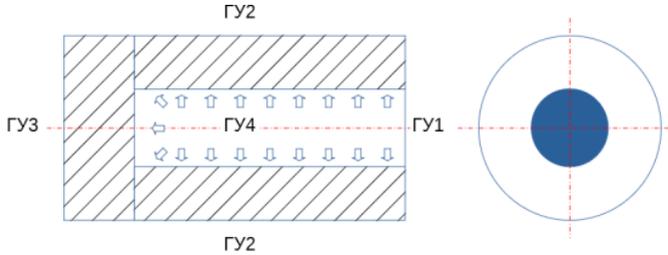


Рис. 2 – Цилиндрический заряд в сечении xu , при $z = 0.5$ рисунок

В результате численного решения получено распределение температуры по времени в сечении XU при z равном 0,5, при постоянном тепловом потоке. На Рисунках 3-5 показано распределение прогрева модельного заряда в различные моменты времени в течении 1 секунды при условиях равных условиям камеры сгорания.

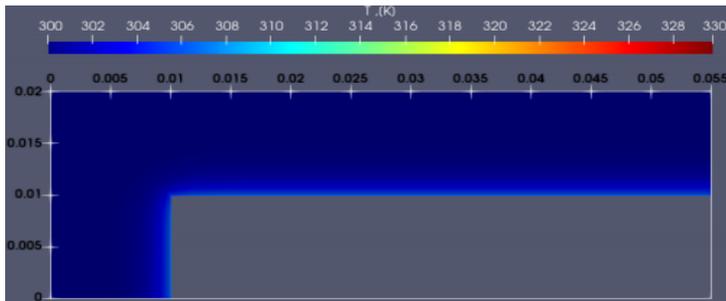


Рис. 3 – Распределение температуры в момент времени – 0 с.

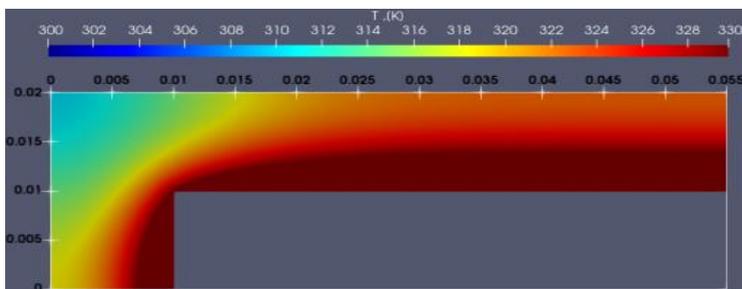


Рис. 4 – Распределение температуры в момент времени – 0.5 с.

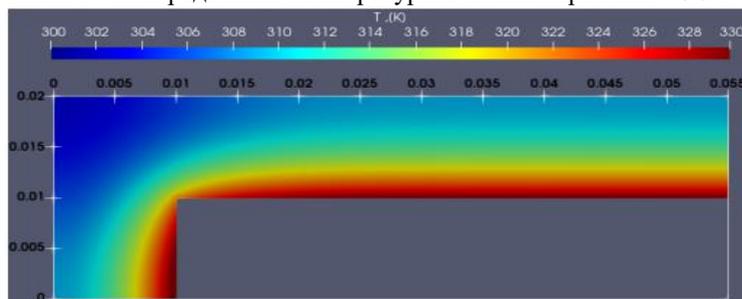


Рис. 5 – Распределение температуры в момент времени – 1 с.

Последующее увеличение величины теплового потока приводит к изменению температурного распределения [4].

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032

Литература:

1. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с
2. Moukalled F., Mangani L. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*. Springer, 2016. – XIV. 791 p
3. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
4. Бургомистренко Р. Ю. Математическое моделирование прогрева и теплового состояния высокоэнергетических наполнителей: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 16.03.01 - Техническая физика / Бургомистренко, Роман Юрьевич - Томск: [б.и.], 2020.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА МОЛНИЕЗАЩИТЫ НОСОВОГО ОБТЕКАТЕЛЯ САМОЛЕТА НА ПОГОДНЫЙ РАДАР В ГРОЗОВЫХ УСЛОВИЯХ

О.С. Белова, А.И. Костиков, М.А. Шкилькова
Национальный исследовательский университет "МЭИ",
BelovaOS@mpei.ru

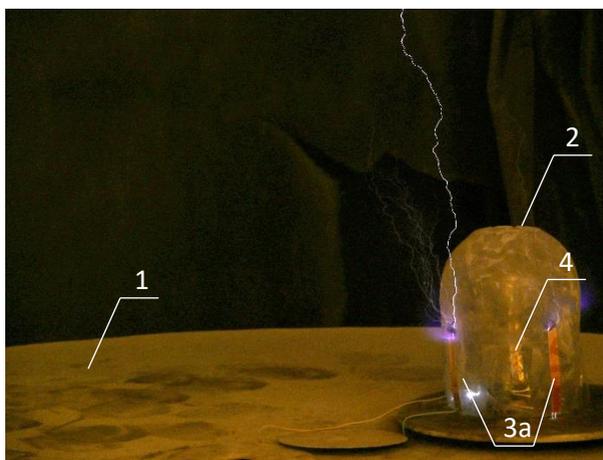
Представлены результаты исследования, с использованием искусственной грозовой ячейки, влияния способа молниезащиты носовых обтекателей самолетов на установленный под ним погодный радар. Приведена оценка уровней сигналов, наводимых на модели антенны радара при наличии на его поверхности моделей полосового или сегментного молниеотводов. Выявлено, что величина наводимых на антенне радара сигналов при использовании полосовых молниеотводов ниже, чем при сегментных молниеотводах.

Results of a physical simulation, using an artificial thunderstorm cell, of the influence of the lightning protection method of aircraft nose radome on the weather radar installed inside them have presented. Estimation of the signal levels induced on a radar antenna model in the presence of strip and segment lightning rods has carried out. It was revealed that the value of signals induced on the radar antenna will be less for the strip lightning rod application than for the segment lightning rods.

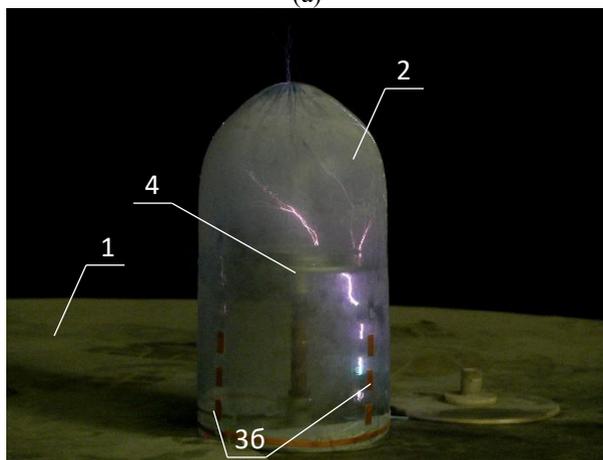
Носовые обтекатели самолетов предназначены для защиты антенны погодного радара в условиях полета. Для защиты их и находящегося под ними оборудования от воздействия атмосферного электричества и молнии применяются сплошные полосовые и сегментные молниеотводы, располагающиеся обычно на внешней поверхности носового обтекателя [1-3]. В полете также на поверхностях полового диэлектрического обтекателя могут дополнительно накапливаться заряды статического электричества. Поэтому в грозовых условиях при формировании разряда с молниеотводов на антенне погодного радара внутри обтекателя могут наводиться сигналы, которые могут приводить к нарушению нормального функционирования погодного радара и связанного с ним компьютерного оборудования, что может представлять опасность для самолета [4-7]. Цель работы, используя искусственную грозовую ячейку отрицательной полярности, исследовать влияние способа молниезащиты носового обтекателя самолеты (сплошными полосовыми или сегментными молниеотводами) на характеристики сигналов, регистрируемых на модели антенны погодного радара при формировании разрядных явлений с моделей молниеотводов, по поверхностям обтекателя и внутри него.

При проведении экспериментов модели носовых обтекателей с четырьмя полосовыми или сегментными молниеотводами размещались

на заземленном электростатическом экране в электрическом поле искусственной грозовой ячейки потенциалом 1,2 МВ [5]. Антенна радара под обтекателем моделировалась плоской антенной диаметром 15 см. Характерная картина разряда при полосовых (а) и сегментных (б) молниеотводах показана на Рисунке 1.



(а)



(б)

1 – заземленный экран, 2 – модель носового обтекателя, полосовые (3а) и сегментные (3б) молниеотводы, 4 – антенна

Рис. 1 – Картина разряда при полосовых (а) и сегментных (б) молниеотводах

С помощью цифрового осциллографа одновременно регистрировался импульс тока разряда, формирующегося с модели молниеотводов на внешней поверхности модели обтекателя, и сигнал, наводимый на модели антенны, установленной внутри моделей носовых обтекателей. Характерные осциллограммы импульсов тока разряда с модели молниеотвода и сигналов, регистрируемых на антенне, показаны на Рисунке 2. В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие параметры импульса тока и наведенных сигналов: $|I_{max}|$ и ΔT – амплитуда и длительность импульса тока (сигнала); $a_{0,3}$ – крутизна импульса тока, соответствующая уровням 0,3 и 0,9 от максимума; $|Q_{сумм}|$ – суммарный протекший заряд.

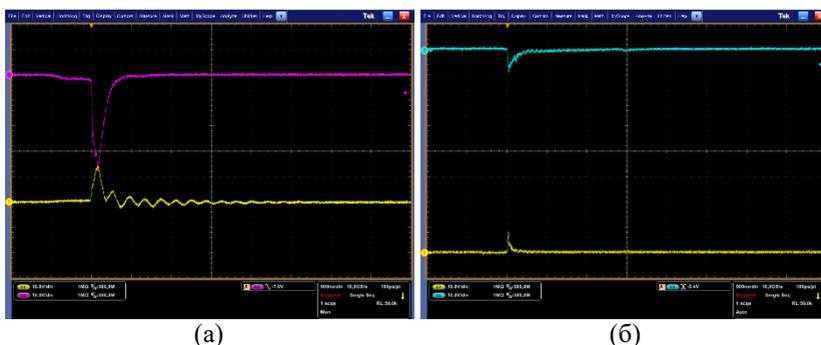


Рис. 2 – Осциллограммы импульсов тока (сигналов), регистрируемых на а) полосовом молниеотводе и антенне; б) сегментном молниеотводе и антенне

Результаты проведенного анализа токовых характеристик и сигналов на антеннах при полосовых молниеотводах обобщены в Таблице 1; при сегментных молниеотводах – в Таблице 2.

Таблица 1 – Параметры сигналов при полосовом молниеотводе

	ΔT , мкс	$a_{0,3}$, А/нс	$ I_{max} $, А	$ Q_{сумм} $, мкКл
Молниеотвод	$[1,2 \pm 0,7]$	$[8,4 \pm 12,9]$	$[37,6 \pm 18,0]$	$[5,3 \pm 1,7]$
Антенна	$[2,2 \pm 0,9]$	$[7,5 \pm 10,6]$	$[26,7 \pm 11,9]$	$[4,1 \pm 1,1]$

Таблица 2 – Параметры сигналов при сегментном молниеотводе

	ΔT , мкс	$a_{0,3}$, А/нс	$ I_{max} $, А	$ Q_{сумм} $, мкКл
Молниеотвод	$[1,3 \pm 0,9]$	$[4,2 \pm 8,2]$	$[36,5 \pm 25,6]$	$[7,6 \pm 12,6]$
Антенна	$[1,1 \pm 0,8]$	$[5,9 \pm 10,3]$	$[38,1 \pm 25,1]$	$[9,5 \pm 13,2]$

При формировании разряда с моделей полосовых или сегментных молниеотводов на внешней поверхности обтекателя на модели антенны, расположенной внутри обтекателя, формируется сигнал, сопоставимый по величине с сигналом на молниеотводах. Однако амплитуда сигнала на антенне может достигать 83 А при полосовом молниеотводе и 110 А при сегментном. В среднем, для моделей носовых обтекателей с полосовыми молниеотводами, величина наводимого на антенне сигнала оказывается на 30 % ниже сигнала на молниеотводе. Более того, протекший через модель антенны заряд, при использовании моделей сегментных молниеотводов, в среднем, в 2,2 раза больше. При этом установлено, что, в отличие от использования сплошных полосовых молниеотводов, для моделей носовых обтекателей с сегментными молниеотводами величина сигнала, наводимого на антенне под обтекателем, в среднем, оказывается выше амплитуды импульса тока на молниеотводе. Это может быть связано с тем, что при сегментных молниеотводах вклад в формирование сигнала на антенне под обтекателем могут вносить не только разряд между молниеотводом и искусственной грозовой ячейкой, но и разряды по внешней поверхности обтекателя и внутри обтекателя между краем антенны и внутренней поверхностью обтекателя (реверсные разряды [5]).

Таким образом, можно ожидать, что с точки зрения защиты погодного радара в грозовых условиях эффективнее применять полосовые молниеотводы на внешней поверхности носовых обтекателей самолетов.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2020-0019).

Литература:

1. *Hall A.* Thunderstorm Protection of Aircraft Radomes // International Conference on Lightning and Static Electricity. – Seattle, USA, – 2005.
2. *M.A. Uman, R.A. Rakov.* The interaction of lightning with aerospace vehicles // Progress in Aerospace Sciences. – vol. 39, – Elsevier Sciences Ltd, – pp. 61-81, – 2003.
3. *X. Teng, G. Liu, Z. Yu, X. Zhuang, Y. Zhao.* Research on Initial Lightning Attachment Zone for Aircraft // 3rd International Conference on Electric and Electronics. – Hong Kong, – Dec. 2013.
4. *P.R.P. Hoole, M.R.M. Sharip, J. Fisher, K. Pirapaharan, A.K.H. Othman, N. Julai, S.A. Rufus, S. Sahrani, S.R.H. Hoole.* Lightning Protection

of Aircraft, Power Systems and Houses Containing IT Network Electronics // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. – 2017, – Vol. 9, – No. 3-10.

5. Экспериментальное изучение воздействия искусственных заряженных аэрозольных облаков на модели носовых обтекателей самолетов / А.Г. Темников, Л.Л. Черненский, А.В. Орлов, О.В. Полякова // Письма в ЖТФ, – 2010, – т. 36, – вып. 18, – с. 40-47.

6. *D. Morgan, C.J. Hardwick, S.J. Haigh, A.J. Meakins*. The Interaction of Lightning with Aircraft and the Challenges of Lightning Testing // Aerospace Lab Journal 5, – ALO5-11, – pp. 1-10, – 2012.

7. *P.R.P Hoole, J. Fisher, K. Pirapaharan, A.K.H. Othman, N. Julai, C.V. Aravind, K.S. Senthilkumar, S.R.H. Hoole*. Determining Safe Electrical Zones for Placing Aircraft Navigation. Measurement and Microelectronic Systems in Static Thunderstorm Environment // International Journal of Control Theory and Applications, – vol. 10, – no. 16, 2017.

АНАЛИЗ ПАРКА ГПА В РОССИИ И МЕРЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВХОДНЫХ УСТРОЙСТВ ГТУ

Е.А. Беляев, В.А. Зрелов
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева,
г. Самара, belyaev.ea@mail.ru

В работе рассматриваются пути повышения технико-экономических показателей входных устройств ГТУ. Проанализирован парк применяемых ГПА. Выявлена необходимость в разработке методик проектирования унифицированных входных устройств ГТУ и сопряженного расчета напряженно-деформированного состояния и аэродинамического совершенства входного устройства ГТУ. Представлены прогнозируемые экономические эффекты.

The report examines ways to improve the technical and economic indicators of the input devices of the gas turbine plant. The park of the used GTU has been analyzed. The need for the development of methods for the design of unified input devices of gas turbine units and coupled calculation of the stress-strain state and aerodynamic perfection of the input device of gas turbines was revealed. The projected economic effects are presented.

В настоящее время потребности в газоперекачивающей технике для реконструкции и технического перевооружения компрессорных станций в России оцениваются около 1,5-2 млн. кВт в год (около 125 ГПА).

При этом одной из проблем в этой области является необходимость повышения экономичности газотурбинных установок.

Актуальным способом увеличения экономичности ГТУ является повышение эффективности входных устройств (ВУ). Сложность структуры и большие скорости потока в ВУ не позволяют достаточно точно определить гидравлические потери с помощью методов одномерной газовой динамики. Существенный рост производительности компьютерной техники, произошедший за последние десятилетия, создал благоприятные условия для применения численных методов (методов вычислительной гидромеханики) для повышения эффективности и экологичности ВУ. При этом экспериментальные исследования становятся средством для настройки параметров численного эксперимента, и верификации получаемых результатов.

Применяемые ранее эмпирические методы проектирования входных трактов имеют ряд недостатков, обусловленных, как техническими, так и фундаментальными причинами. Технические трудности обусловлены большой трудоемкостью и стоимостью таких исследований, зависимостью от внешних условий, ограниченностью получаемой информации, а фундаментальные – влиянием масштабного фактора.

Таким образом, развивающиеся средства проектирования и математического моделирования сложных технических устройств требуют их интеграции в соответствующую методику проектирования ВУ ГТУ.

Целью данной работы является анализ состояния применяемых газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и определение методов повышения технико-экономических показателей входных устройств ГТУ.

Один из путей повышения технологичности входных устройств - применение унифицированных модульных конструкций.

Проанализировав парк применяемых ГПА, по признаку «мощность привода» их можно разделить на 4 группы:

1. До 8 МВт;
2. 10 – 12 МВт;
3. 16 – 18 МВт;
4. 25 – 55 МВт.

В настоящее время в России востребованными являются агрегаты, входящие в последние 2 категории установок, поэтому для них целесообразно спроектировать единый входной тракт. Тогда входные устройства будут отличаться только размерами блока фильтров и количеством фильтр-элементов.

Для повышения экономической эффективности входных устройств ГПА предлагается при разработке устройства применять методики проектирования унифицированного ВУ, сопряженного расчёта напряженно-деформированного состояния и аэродинамического совершенства входного устройства ГТУ. Применение указанной методики при создании унифицированного ВУ, позволяет снизить аэродинамическое сопротивление и повысить эффективный КПД ВУ, что положительно сказывается на расходе топлива ГТУ. Поскольку нормативная годовая наработка одного агрегата составляет 6500 ч, снижение расхода топлива на 0,4% в годовом эквиваленте принесет существенный экономический эффект.

По прогнозам, эффект от применения унифицированной конструкции, за счет сокращения номенклатуры используемых материалов и повышения эффективности производства (снижение трудоемкости, повышение производительности труда и снижение материалоемкости продукции), позволяет снизить более чем на 8% себестоимость изготовления продукции.

Литература:

1. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов / под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 584 с
2. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Паровые и газовые турбины для электростанций: учеб. для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 560 с
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.:Машиностроение, 2008.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ НЕДОСТАТКА ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В НЕВЕСОМОСТИ

Е.В.Беляева, Е.С. Гагаркина, И.В.Хромова
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, liza_belaeva_2014@mail.ru;
gagarkina.liza@mail.ru; xromova@corp.nstu.ru

В работе описано негативное воздействие гиподинамии на организм человека. Выявлены особенности работы кровеносной системы при недостаточной физической активности. Выполнены расчетные исследования для сравнения влияния гиподинамии в невесомости и на Земле. Проведен анализ способов компенсации в зависимости от возраста, гендера, типа конституции

и двигательной активности, в том числе сравнивается эффективность упражнений на различные группы мышц. Отдельное исследование посвящено влиянию избытка и недостатка жировой ткани и мышечной массы на работу кровеносной системы при нормальной и недостаточной физической активности.

The work describes the negative impact of physical inactivity on the human body. The peculiarities of the work of the circulatory system with insufficient physical activity have been revealed. Computational studies have been carried out to compare the effect of hypodynamy in weightlessness and on Earth. An analysis of the methods of compensation depending on age, gender, type of constitution and physical activity was carried out, including the comparison of the effectiveness of exercises for various muscle groups. A separate study is devoted to the effect of excess and lack of adipose tissue and muscle mass on the functioning of the circulatory system during normal and insufficient physical activity.

В настоящее время ведётся разработка средств защиты, необходимых для компенсации нарушений в организме человека вследствие гиподинамии в условиях космического полета. Можно выделить три характерные группы по типу двигательной активности: специалисты-операторы, бортинженеры, тренированные космонавты (например, военные летчики).

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 – исследование влияния возраста, гендера, типа двигательной активности человека, вида и величины физической нагрузки на различные группы мышц при разработке средств борьбы с гиподинамией в условиях невесомости и на Земле.

В работе проводится анализ распределения крови по потребителям на Земле и в невесомости (рис. 1). В условиях невесомости происходит значительное перераспределение крови от ног к голове, что важно учитывать при компенсации гиподинамии тренажерами. Также проводится анализ влияния сосудистых реакций (спазм/расширение) на кровоснабжение остальных потребителей (рис. 2).

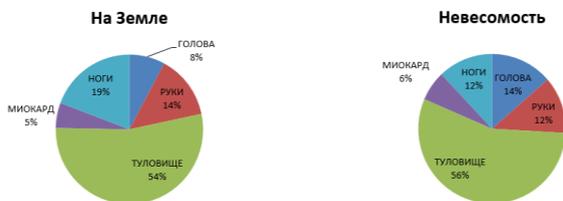


Рис. 1-Сравнение распределения крови по потребителям (минутный объем крови (МОК) в % от общего количества циркулирующей крови) на Земле и в невесомости

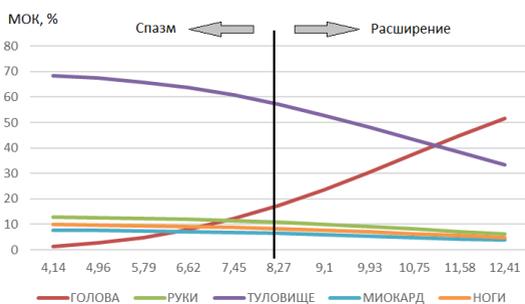


Рис. 2-Влияние спазма/расширения капилляров в голове на перераспределение крови между остальными потребителями в условиях невесомости

В ходе расчетных исследований установлено, что возраст не оказывает значимого влияния на работу кровеносной системы, в отличие от гендера (рис. 3).

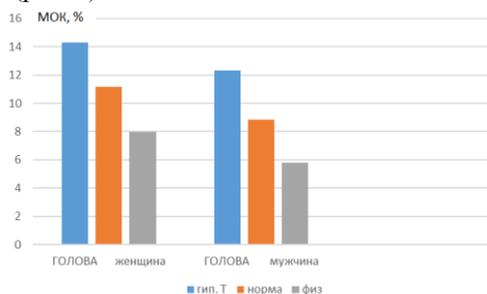
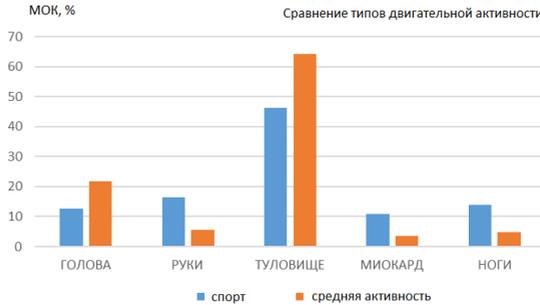


Рис. 3-Сравнение расхода крови на голову при гиподинамии тяжелой формы, норме и физической активности для мужчин и женщин на Земле

Выполнен анализ влияния различных типов двигательной активности, видов и интенсивности физической нагрузки для компенсации негативного воздействия гиподинамии в невесомости (рис. 4).



б

Рис. 4-Сравнение типа двигательной активности для компенсации гиподинамии в условиях невесомости

Литература:

1. Курмазенко Э.А. Конструирование теплообменных аппаратов систем жизнеобеспечения : Учеб. пособие / Э. А. Курмазенко; Моск. авиац. ин-т им. Серго Орджоникидзе М. : Изд-во МАИ, 1991.
2. Пичулин В.С. Математическое моделирование и проектирование индивидуальных систем жизнеобеспечения экипажей космических аппаратов : Учеб. пособие. – М.: МАИ, 2001. – 88 с.
3. Чичиндаев А. В. Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур: монография / А. В. Чичиндаев, И. В. Хромова. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. - 214 с - (Монографии НГТУ). - 3000 экз. - ISBN 978-5-7782-3492-5.
4. I.V. Khromova, Heat Exchange in “Human body - Thermal protection – Environment System,” Journal of Physics: Conference Series, 2017. doi:10.1088/1742-6596/891/1/012084.
6. Березовский В.А. Кологиллов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
7. Основы космической биологии и медицины. Том I. Космическое пространство как среда обитания. М.: Наука, 1975. - 450 с.
8. Основы космической биологии и медицины. Том II. Книга первая. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. М.: Наука, 1975. - 422 с.

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ОБВОДНОЙ КАНАЛ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА- КОНДЕНСАТОРА СКВ

В.А. Коротаева, В.А. Тоескин, А.В. Чичиндаев
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, korotaeva.2017@stud.nstu.ru

В данной работе рассматриваются варианты выбора теплообменника-конденсатора для постоянного значения числа Рейнольдса по горячему тракту и различных значений числа Рейнольдса по холодному тракту. Произведено сравнение температур стенок теплообменника для выявления наиболее оптимального варианта режима течения. Оптимальный режим в данном случае – режим с наименьшим обмерзанием поверхности платины. В заключении приведены результаты сравнения температур пластины при увеличении числа Рейнольдса по холодному тракту.

This paper considers options for choosing a heat exchanger-condenser for constant values of the Reynolds number in the hot path and different values of the Reynolds number in the cold path. A comparison of the temperature of the walls of the heat exchanger is made for the most optimal variant of the flow regime. The optimal mode in this case is the mode with the least freezing of the platinum surface. In conclusion, the results of comparison of temperature plates with an increase in the Reynolds number along the cold path are given.

Введение.

Оптимизация конструкции теплообменника-конденсатора – метод, применяемый для предотвращения обмерзания его поверхности. Главной проблемой возникновения обмерзания является отрицательная температура поверхности [1-5]. Одним из способов борьбы с обмерзанием, применяемым на современных СКВ [2-3], является использование обводного канала по холодному тракту теплообменника. Его применение приводит к обводу части холодного воздуха минуя теплообменную секцию в случае ее обмерзания.

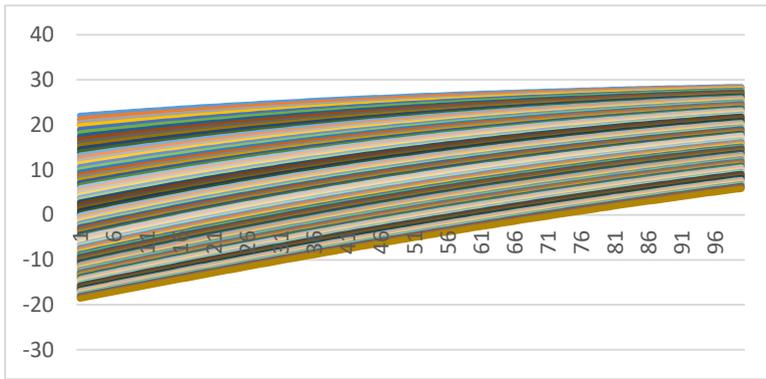
Цель работы – это сравнительный анализ температур поверхности теплообменника-конденсатора для различных значений доли расхода холодного воздуха, протекающих через обводной канал. Последнее моделируется изменением числа Рейнольдса для холодного теплоносителя в интервале 1750...2500 [1-2].

Вариант № 1. Параметры теплоносителей: $Re_1 = 5000$, $Re_2 = 2500$ (воздух в обводной канал не поступает).

В результате анализа распределения температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температур составляет 14°C , а минимальная температура поверхности составляем около -19°C .

Процент обмерзания поверхности в данном случае составляет 25% (рис.1).

Рис.1 – Распределение температур теплообменной поверхности для



варианта расчетов №1.

Вариант №2. Параметры теплоносителей: $Re_1 = 5000$, $Re_2 = 1750$ (в обводной канал поступает 30 % расхода холодного воздуха).

В результате анализа распределения температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температур составляет 15°C, а минимальная температура поверхности составляем около -15 °С. Процент обмерзания поверхности в данном случае составляет 18,6% (рис.1).

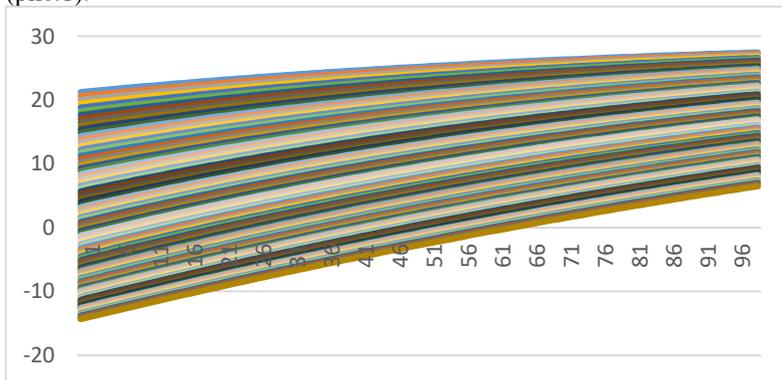


Рис.2 – Распределение температур теплообменной поверхности для варианта №2.

Заключение.

В работе представлены расчеты КПРТ с одним вариантом обребрения при изменении расхода холодного воздуха через обводной канал в холодном тракте теплообменника-конденсатора. Увеличение расхода позволяет снизить процент обмерзания поверхности на 6,5 % за счет увеличения минимальной температуры поверхности теплообменника. Таким образом, эффективность такого метода противообледенительной системы теплообменника имеет ограниченные возможности и следует применять более надежные способы.

Результаты данной работы представляют практический интерес при проектировании теплообменного оборудования, которое работает на влажном воздухе при отрицательных температурах.

Литература:

1. Чичиндаев А.В. Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках: монография / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2012. – 298 с. (Серия «Монографии НГТУ»)

2. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы: учебное пособие / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. – 436 с. - (Серия «Учебники НГТУ»).

3. Дьяченко Ю.В. Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе: учеб пособие / Ю.В. Дьяченко, А.В. Чичиндаев. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 87с.

4. Chichindaev A. V. Modeling of the heat transfer in a compact heat exchanger-condenser with variable finning / A. V. Chichindaev, I. V. D'achenko, D. E. Sidenko // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 41-44.

5. 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»).

СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ КАК ИГРОВАЯ МЕХАНИКА

В.Д. Лиджиев, И.В. Хромова
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, IcyLeamon@gmail.com

В работе описаны способы создания игровых механик для игрового процесса на основе систем жизнеобеспечения. Проведено исследование создания подобных механик ранее, а также предложен концепт геймплея и набор механик, способных в него вписаться.

The work describes the methods of creating a game mechanics on the basis of Life Support Systems. A study of the creation of similar mechanics in the past has been conducted, a concept and hypothetical mechanics that can fit into it have been invented.

В настоящее время активно развиваются цифровые технологии и симуляции, в частности игровая индустрия. При разработке игр требуется брать во внимание множество факторов, таких как ограничения движка, время и возможности команды, но одним из самых важных факторов является создание вовлеченности игрока.

В основе любой игры лежит механика. Игровая механика по определению является способом взаимодействия игрока с игровыми объектами в рамках установленных ограничений игры, изменяющим её состояние и влияющим на принятие игроком последующих решений. Игровой процесс (геймплей) строится на наборе доступных игровых механик с учетом индивидуального стиля игрока.

В данной работе предложен концепт разработки игровых механик на основе систем жизнеобеспечения человека для дальнейшего создания прототипа. Системы жизнеобеспечения весьма сложны в своей конструкции, в частности, при достаточно достоверной симуляции. Кроме того, условия, для которых они разрабатываются, например, космический полет или экстремальные температуры, представляют собой отдельный интерес с точки зрения вовлечения и удержания игрока. Поэтому на их основе может получиться интересный, дающий вызов игровой процесс или дополнительная механика, которая держит игрока в напряжении.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

М.В. Лозовский, А.А. Гоппе, М.В. Горбачев
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, lozovsk2@bk.ru

Проведено численное исследование конвективного теплообмена при условии свободной конвекции около вертикальной пластины с постоянным подводимым тепловым потоком к поверхности. Численный анализ проведен при различных значениях теплового потока, получены зависимости изменения температуры поверхности пластины и профилей скоростей в различных сечениях. Оценка адекватности полученных численных результатов проводилась с помощью сравнения с известными в литературе данными.

Numerical study of convective heat exchange under condition of free convection near vertical plate with constant heat flow to the surface was conducted. The numerical analysis was carried out at different values of heat flow, the dependences of changes in the plate surface temperature and velocity profiles in different cross-sections were obtained. The adequacy of the obtained numerical results was assessed by comparison with the data known in the literature.

Естественная (или свободная) конвекция, возникающая вследствие градиентов плотностей, очень важна в ряде технических устройств и агрегатов. Кроме того, плавучесть очень существенна в окружающей среде, поскольку разница плотностей воздуха около поверхности тела и окружающего пространства может привести к сложной структуре потока. Аналогичные эффекты наблюдаются и в замкнутых областях и каналах, например, в вентилируемых фасадах зданий, отапливаемых помещениях и др. Благодаря широкой распространенности процессов, протекающих при условиях свободной конвекции, задача обтекания плоской пластины с различными граничными условиями в последние время привлекает внимание многих исследователей.

В настоящей работе рассмотрено стационарное ламинарное течение жидкости около вертикальной пластины при постоянном по длине подводимом тепловым потоком. Данная задача решена в таких математических пакетах, как *MathCAD* и *Ansys*. В системе *MathCAD* используется преобразованная система дифференциальных уравнений в частных производных. В *Ansys* задача решается с помощью трех основных дифференциальных уравнений:

– неразрывности:

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} = 0;$$

– движения:

$$u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} = \nu \frac{d^2u}{dy^2} + \beta g(T - T_{\infty});$$

– энергии:

$$u \frac{dT}{dx} + v \frac{dT}{dy} = a \frac{d^2T}{dy^2}.$$

На рисунке 1 представлены расчетная схема моделирования свободно-конвективного теплообмена около вертикальной пластины длиной L .

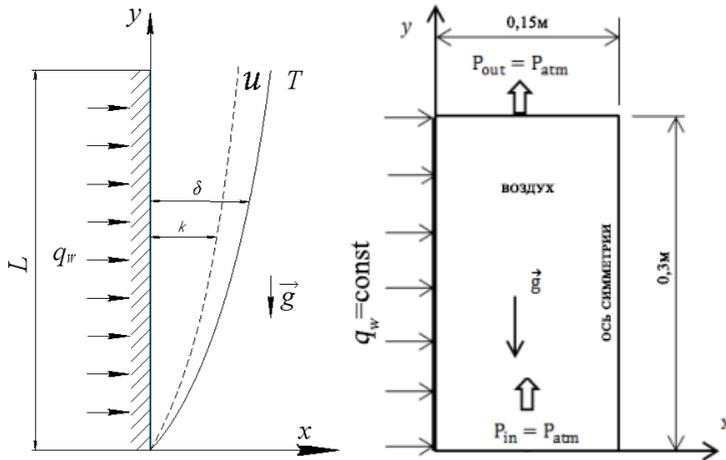


Рис. 1 – Расчетная схема

Оценка адекватности полученных результатов проведена путем сравнения с результатами работы [3]. Полученные данные представлены на рисунках 2-4. Температура поверхности стенки, полученная при расчете в программе *Ansys*, изменяется от 300К до 371К, в *MathCAD* от 300К до 367К. Профиль температуры имеет параболический вид. При удалении от поверхности пластины температура монотонно уменьшается и стремится к температуре окружающей среды.

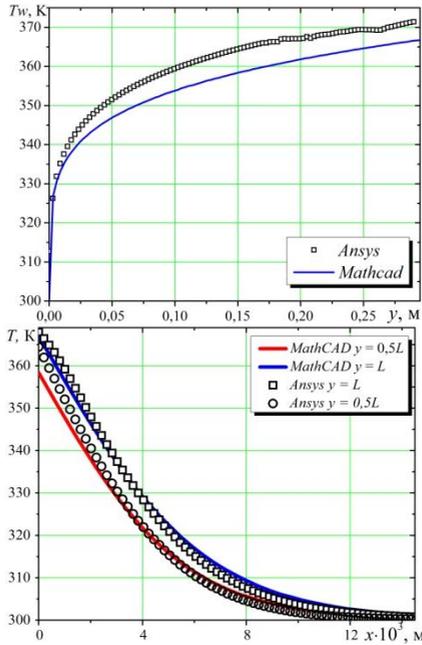


Рис. 2 – Температура стенки и профиль температуры

Скорость жидкости (рисунок 3) увеличивается и достигает своего максимального значения достаточно близко к поверхности при $x \leq 0,005$ м, а затем монотонно убывает до нуля.

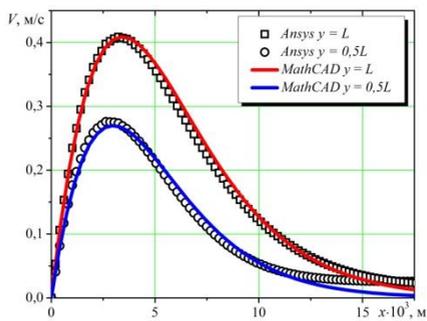


Рис. 3 – Профиль скорости

Сравнение результатов численного моделирования в *Ansys* и *MathCAD* позволило получить максимальные отклонения порядка 10%.

Зная скоростные и температурные поля с практической точки зрения интересно исследовать наиболее важные характеристики теплообмена – коэффициент теплоотдачи на пластине.

На рисунке 4 приведено сравнение данных, полученных в настоящей работе, с экспериментально полученным критериальным уравнением Исаченко. Отклонения составляют менее 10%.

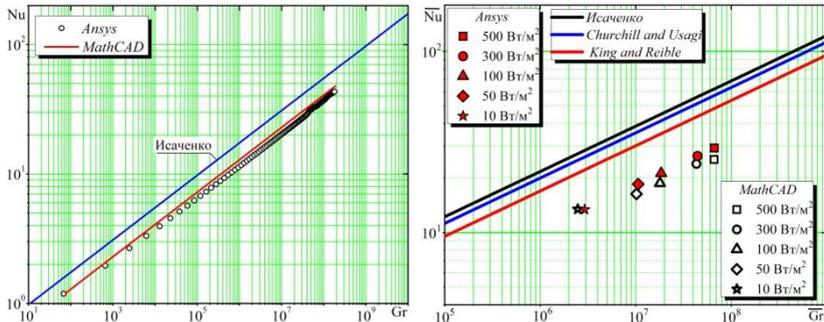


Рис. 4 – Зависимость локального и среднего числа Nu

Проинтегрировав локальные значения, получим среднее значение числа Грасгофа и Нуссельта. При изменении величины теплового потока, подводимого к поверхности пластины, расхождение средних значений Nu и Gr, рассчитанных в *Ansys* и *MathCAD* составляет менее 10%. С зависимостями, известными в литературе, расхождение несколько больше. Это может быть связано со следующими факторами:

- известные критериальные уравнения получены в ходе натурального эксперимента;
- численная модель свободно-конвективного течения является двухмерной;
- при моделировании задачи был принят ряд допущений, которые также повлияли на результат.

Литература:

1. Investigation of natural convection heat transfer at constant heat flux along a vertical and inclined plate / *Sebiha Yıldız*. – Journal of Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 4. – № 6. – P. 2432-2444
2. Numerical simulation on laminar free-convection flow and heat transfer over a vertical plate with constant heat flux / *Asish Mitra*. – J.Mech.Cont.& Math Science. – 2016. – Vol. 10. – № 2. – P. 1487-1499
3. *Исаченко В. П.*, Теплопередача: учебник для вузов. – 1975. – 488 с.

КАЧЕСТВО И ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Д. Р. Попов¹, М.Г. Гиорбелидзе

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева
г. Самара, ruslanppv@rambler.ru

Рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на качество вакуумных ионно-плазменных покрытий. Дано краткое описание процесса ионно-плазменного напыления. Выделены основные преимущества и недостатки.

The main factors influencing the quality of vacuum ion-plasma coatings are considered. A brief description of the process of ion-plasma spraying is given. The main advantages and disadvantages are highlighted.

Вопросы повышения надежности и ресурса изделий авиационной и космической техники продолжают оставаться актуальными направлениями. Решение этих вопросов возможно путем нанесения специальных покрытий разными методами. Достаточно широкое распространение получили способы осаждения покрытия в вакууме посредством ионно-плазменных технологий [1-6]. В этих технологиях струя плазмы, состоящая из атомов, ионов металла и электронов, генерируемая за счет электродугового испарения или ускорения в магнитном поле, осаждается на изделие в вакуумной камере.

Основные отличительные особенности комплекса вакуумного ионно-плазменного напыления:

- Широкий спектр и высокая оперативность по схеме различных типов покрытий, формируемых на поверхностях имплантатов;
- Малое количество рабочего и обслуживающего персонала средней квалификации;
- Полный автоматизированный контроль параметров процесса нанесения и качества покрытий с постоянным ведением протокола;
- Оборудование имеет минимальные габаритные размеры, потребление электроэнергии и воды для решения данных технологических задач:
 - Простота монтажа оборудования;
 - Компактность, мобильность, комплекса вакуумного напыления;
 - Конструкция оборудования имеет удобный доступ к отдельным узлам и агрегатам для обслуживания и ремонта;

- Хорошая отработанность всех комплектующих изделий и узлов комплекса вакуумного напыления;
- Мобильность, компактность, комплекса напыления;
- Возможность развития комплекса вакуумного напыления покрытий как по технологическим возможностям, так и по увеличению производительности;
- Предусмотрена возможность индивидуально подобрать оптимальную номенклатуру комплектующих комплекса вакуумного напыления для решения конкретных технологических задач Заказчика [1-2].

К достоинствам ионно-плазменного напыления относят:

- 1) контроль свойств осаждаемого покрытия в процессе напыления;
- 2) равномерность покрытия и высокая адгезионная прочность;
- 3) возможность нанесения покрытий из тугоплавких и неплавящихся материалов;
- 2) постоянство стехиометрического состава поверхности изделия;
- 5) управление составом катодной мишени на протяжении всего процесса напыления;
- б) возможность очистки напыляемой поверхности изделия и наращиваемого покрытия распылением.

При всех достоинствах ионно-плазменное напыление имеет также ряд недостатков:

- 1) ограничение, заключающееся в возможности нанесения покрытий только из металлов и сплавов, так как катод должен быть электропроводным;
- 2) невысокая производительность процесса;
- 3) повышенная сложность технологии и оборудования;
- 4) ограниченность размеров изделия габаритами вакуумной камеры;
- 5) низкие показатели энергетических коэффициентов распыления, испарения и конденсации;
- б) невозможность нанесения покрытий на внутренние и другие поверхности деталей, которые не имеют прямого доступа для плазменного потока.

Дальнейшее совершенствование технологии ионно-плазменного напыления невозможно без решения ряда вопросов, оказывающих существенное влияние на качество получаемого покрытия [6]:

- 1) необходимо учесть взаимодействие плазмы с реакционными газами при переносе испаряемого материала;
- 2) необходимо учесть взаимодействие между поверхностью и

частицами из атомарного потока и их влияние на протекание реакций при выращивании покрытий;

3) необходимо учесть электрообменные процессы между плазмой в потоке с поверхностью изделия в процессе осаждения покрытия;

4) обеспечить оптимизацию структуры многослойных и многокомпонентных систем для значительного повышения физико-химических свойств покрытия;

5) учесть влияние и установить закономерности технологической наследственности, обусловленной технологическим методом на структуру и свойства деталей с покрытиями;

6) установить влияние и закономерности основных технологических параметров процесса напыления на свойства осаждаемых покрытий;

7) определить оптимальные области реализации для многокомпонентных и многослойных покрытий.

Исследование и учет вышеприведенных факторов с последующей разработкой новых технологических режимов позволит повысить качество и ключевые свойства покрытий. В рамках данной работы была решена прикладная задача, учтено влияние составляющих плазменного потока на структуру и свойства покрытия, проведена модернизация оборудования и технологической оснастки для снижения микрокапельной фазы при выращивании покрытия.

Литература

1 Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. – М.: Наука и технологии, 2005. – 456 с.

2 Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математические методы моделирования процессов нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1999. – 305 с.

3 Богданович В.И. Разработка методологических принципов проектирования технологий формирования поверхностного слоя изделий плазменным напылением // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1999. – №2. – С.87-94.

4 Богданович В.И. Кинетика гетерогенного плазмохимического синтеза нитридных покрытий из плазменных потоков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1999. – №1. – С.65-71.

5 Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical modelling of thin-film polymer heating during obtaining of nanostructured ion-plasma coatings // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P.630-638. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.677.

6 Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Main problems of

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ

В.А. Тоескин, В.А. Коротаева, А.В. Чичиндаев
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, toeskin.2017@stud.nstu.ru

В данной работе рассматриваются варианты выбора теплообменника-конденсатора для различных значений числа Рейнольдса по горячему тракту и фиксированного значения числа Рейнольдса по холодному тракту. Проведено также сравнение температур стенок теплообменника для выявления зон с отрицательным значением температуры. Далее в заключении приведены результаты сравнения температур пластины при увеличении числа Рейнольдса по горячему тракту.

The article discusses options for choosing a heat exchanger-condenser for different values of the Reynolds number in the hot path and a fixed value of the Reynolds number in the cold path. A comparison of the temperatures of the walls of the heat exchanger was also carried out to identify zones with a negative temperature value. Further in the conclusion, the results of comparison of the plate temperatures with an increase in the Reynolds number along the hot path are given.

Введение.

Для предотвращения обмерзания теплообменника-конденсатора применяется метод оптимизации его конструкции. Данный метод позволяет бороться с причиной возникновения обмерзания – отрицательной температурой поверхности [1-5]. В данной работе оптимизация происходит за счет изменения режимных параметров горячего теплоносителя.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ температур поверхности теплообменников-конденсаторов для различных значений числа Рейнольдса для горячего теплоносителя, которые находятся в интервале 2500...10000 [1-2].

Вариант №1. Параметры теплоносителей: $Re_1 = 2500$, $Re_2 = 2500$.

В результате анализа распределения температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температуры составляет 29 °С, минимальные температуры поверхности составляют около -20 °С.

В данном случае наблюдается значительное обмерзание поверхности (29,6%) (рис. 1).

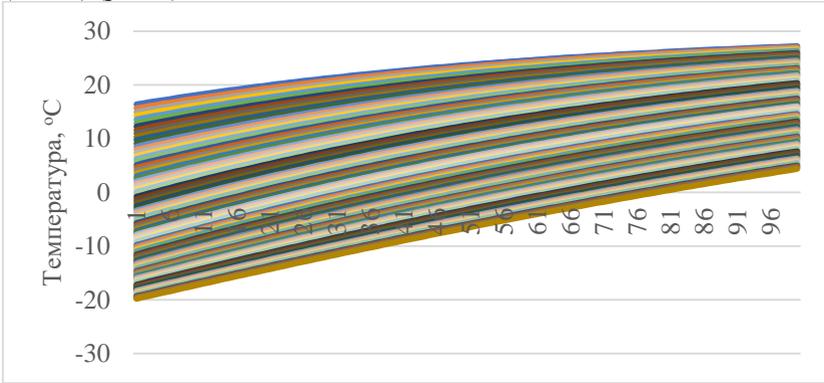


Рис. 1 – Распределение температур теплообменной поверхности для варианта расчетов №1.

Вариант №2. Параметры теплоносителей: $Re_1 = 10000$, $Re_2 = 2500$.

В результате анализа распределения температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температуры составляет 26 °С, минимальные температуры поверхности составляют около -8 °С. В данном случае наблюдается небольшое обмерзание поверхности (7,35%) (рис. 2).

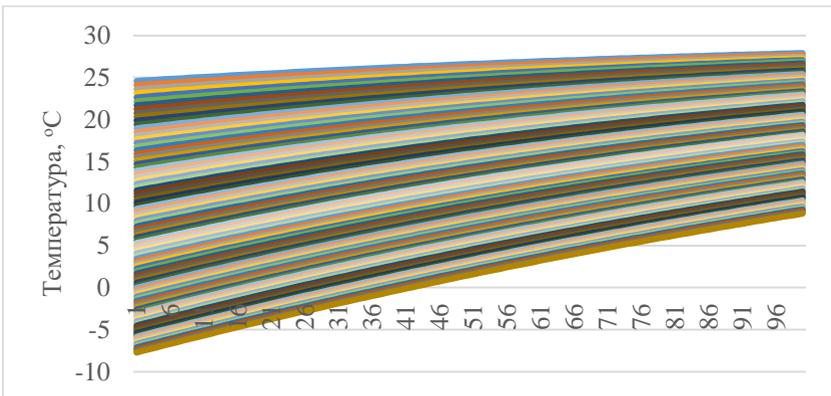


Рис. 2 – Распределение температур теплообменной поверхности для варианта расчетов №2.

Заключение.

В данной работе представлены расчеты КПРТ с одним вариантом оребрения при увеличении числа Рейнольдса горячего теплоносителя. Увеличение числа Рейнольдса позволяет сократить перепад температуры поверхности на (2...3) °С. Также это приводит к увеличению минимальной температуры поверхности теплообменника и уменьшению площади обмерзания поверхности КПРТ. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса возможно увеличение минимальной температуры поверхности выше 0 °С, предотвращая обмерзание.

Результаты настоящей работы представляют практический интерес при проектировании теплообменного оборудования, работающего на влажном воздухе при отрицательных температурах.

Литература:

1. Чичиндаев А.В. Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пла-стинчато-ребристых теплообменниках: монография / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2012. - 298 с. (Серия «Монографии НГТУ»)

2. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы: учебное пособие / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. – 436 с. - (Серия «Учебники НГТУ»).

3. Дьяченко Ю.В. Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе: учеб пособие / Ю.В. Дьяченко, А.В. Чичиндаев. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 87с.

4. Chichindaev A. V. Modeling of the heat transfer in a compact heat exchanger-condenser with variable finning / A. V. Chichindaev, I. V. D'achenko, D. E. Sidenko // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 41-44.

5. 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»).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОЛОВНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Р.А. Уперчук, Д.В. Сачук

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, г. Самара, uperchuk.roman@yandex.ru

Работа посвящена исследованию алгоритма автоматизированного проектирования конических головных обтекателей (ГО) для ракет-носителей (РН), выводящих полезную нагрузку (ПН) в виде аппарата-инспектора на низкую круговую орбиту (НКО). Выполнена реализация алгоритма в среде Delphi.

The work is devoted to the study of an algorithm for the computer-aided design of nose cones for launch vehicles that launch a payload in the form of an inspector apparatus into a low circular orbit. The algorithm is implemented in the Delphi programming environment.

Полезный груз в процессе движения в составе РН подвергается воздействию тепловых и силовых нагрузок, которые по величине значительно превышают нагрузки, соответствующие космическим условиям функционирования. В связи с этим для сохранения работоспособности ПН она на атмосферном участке полета полностью или частично закрывается ГО, который после прохождения плотных слоев атмосферы сбрасывается.

Автоматизация проектирования способствует значительному сокращению времени на этапах подготовки технического задания и аванпроекта. Проектируемые ГО должны удовлетворять основным требованиям, к которым можно отнести конструктивные и технико-экономические требования, требования по назначению, надежности, эксплуатации, удобству технического обслуживания, ремонту и хранению, транспортабельности, безопасности.

Результатом работы является написание вычислительной программы в среде *Delphi*, позволяющей выполнять расчёт головных обтекателей в первом приближении. Программу планируется использовать в рамках научной работы по проектированию космической миссии инспекции [1]. Расчёт ведётся по методике В.И. Куренкова, изложенной в [2].

Программа разработана для конических ГО, представляющих собой однородную тонкостенную оболочку. Выбор иных вариантов компоновки ГО будет предусмотрен в дальнейших версиях программы. В программе реализован итерационный подход к программированию.

Задаваемые исходные данные выступают в качестве нулевого приближения, которые затем изменяются в дальнейших расчётах.

В качестве ПН используется аппарат-инспектор, выводимый на НКО с целью инспектирования отработавших КА или различных объектов космического мусора. Масса ПН задаётся пользователем.

Коэффициент, учитывающий неполноту заполнения ГО ПН, для аппарата-инспектора принимается в диапазоне 1,5..2,0. Средняя плотность ПН для КА, функционирующего на НКО, находится в пределах 300..700 кг/м³. Точное значение может быть найдено по результатам твердотельного моделирования КА в САПР. Программа позволяет проводить оптимизационный расчёт с целью нахождения оптимальных значений коэффициента неполноты заполнения ГО ПН и плотности, обеспечивающих минимальные габариты и массу ГО, при которых выполняется условие прочности. Составляется целевая функция от соответствующих параметров, которая минимизируется посредством метода перебора по сетке.

При помощи компонента *ADConnection* вычислительная программа подключена к базе данных (БД) в формате *accdb* по основным применяемым РН [3]. Пользователь может рассчитать параметры ГО для конкретной РН или самостоятельно ввести габаритные размеры. В программе имеется возможность подбора оптимального удлинения ГО по критериям минимальной массы ГО и минимальных габаритов ГО. Поиск соответствующих значений выполняется посредством метода перебора по сетке.

Прочностной расчёт проводится для расчётного случая, задаваемого пользователем. Пользователю необходимо ввести значения высоты и угла атаки. Плотность атмосферы определяется по барометрической формуле для заданной высоты, местная скорость звука и скорость воздушного потока рассчитываются при помощи интерполяционной формулы Лагранжа по табличным значениям из пособия [4]. Расчёт коэффициентов лобового сопротивления и подъёмной силы производится в первом приближении по методике [2] как функции угла атаки и угла полураствора конической части ГО.

Расчёт на прочность производится по методике [5]. Пользователю необходимо ввести предел прочности материала ГО или выбрать существующий из соответствующей БД в формате *accdb*. Результатом прочностного расчёта является проверка по окружным напряжениям. Если условие прочности выполняется, программа выводит пользователю результаты расчёта. В противном случае пользователю выводится сообщение о необходимости изменения исходных данных.

Тестовый расчёт был проведён для следующего нулевого приближения: масса ПН 1200 кг, плотность ПН 450 кг/м³, коэффициент неполноты заполнения ГО 1,8, коэффициент запаса 1,8. Длина РН составляет 28 м, предел прочности материала ГО 300 МПа. В результате 7 итераций был получен следующий результат: масса ГО 696,9 кг, толщина стенки ГО 62,74 мм.

Полученные результаты служат исходными данными для формирования конструктивной схемы ГО в *Femap with Nastran* для силового анализа методом конечных элементов. В перспективе планируется автоматизация создания твердотельной модели в *Nastran* с возможностью расчёта.

Преимуществами разработанной программы являются простота алгоритма, применение современных проектировочных подходов (моделирование в САПР и т.п., использование БД, методы оптимизации), что в итоге способствует сокращению времени на проектирование изделий ракетно-космической техники. Предлагается использовать программу на государственных и частных космических предприятиях, а также в учебных целях при выполнении курсового и дипломного проектирования.

Литература:

1. Уперчук Р.А., Сачук Д.В., Шулепов А.И. Разработка математической модели инспекции вышедших из строя спутников, движущихся по низким круговым орбитам / Р.А. Уперчук, Д.В. Сачук, А.И. Шулепов // Сборник тезисов докладов XLVI Международной молодёжной научной конференции "Гагаринские чтения". 2020. - С. 312-313.

2. Куренков, В.И. Основы автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие /В.И. Куренков, А.А. Панков, - Самара: Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королёва (нац. исслед. ун-т), 2012. - 236с.

3. Расчет проектно-баллистических характеристик и формирование проектного облика межорбитальных транспортных аппаратов с электрореактивной двигательной установкой с использованием информационных технологий: учеб. пособие / В.В. Салмин, А.С. Четвериков, М.Ю. Гоголев. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2019. – 199 с.: ил.

4. Васильев, В.В. Расчёт аэродинамических характеристик летательных аппаратов [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие /В.В. Васильев [и др.]. – Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-

т им. С.П. Королёва (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф.дан (2,315 Мбайт). – Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

5. Основы строительной механики ракет [Текст] / Л. И. Балабух, К. С. Колесников, В. С. Зарубин [и др.] - М.: Высш. шк., 1989. –496 с.

РАСЧЁТ МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АППАРАТА-ИНСПЕКТОРА

Р.А. Уперчук, Д.В. Сачук

**Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва, г. Самара,
uperchuk.roman@yandex.ru**

В рамках работы выполнен расчёт во втором приближении массовых характеристик комплексной двигательной установки (КДУ) аппарата-инспектора, работающего на круговой орбите.

In this work the calculation in the second approximation of the mass characteristics of the complex propulsion system of the inspector apparatus operating in a circular orbit is performed.

Для обеспечения необходимого значения характеристической скорости, маневрирования и коррекции орбиты аппарат-инспектор должен быть оснащён КДУ. При проектировании КА рекомендуется выбирать уже существующие КДУ, но при существенном различии характеристик целесообразно разработать новый образец КДУ [1].

Проектируемый аппарат-инспектор предназначен для инспектирования отработавших спутников или различных фрагментов космического мусора [2]. Исходные данные, необходимые для расчёта массовых характеристик КДУ, представлены в таблице 1. Используется методика расчёта массовых характеристик КДУ, изложенная в статье [1]. В расчёте предполагается, что изменение наклона орбиты осуществляется при помощи ракетного блока (РБ) 3 ступени ракеты-носителя (РН), поэтому приращение характеристической скорости для изменения наклона орбиты равно нулю. Баллистическая схема полёта КА принимается следующей: КА выводится на низкую круговую орбиту (НКО); при помощи РБ 3 ступени изменяется наклонение орбиты; КА переходит на переходную эллиптическую орбиту (ПЭО); КА переходит на рабочую круговую орбиту (РКО); КА переходит на ПЭО спуска; КА переходит на НКО спуска; осуществляется сход с НКО спуска и захоронение КА.

Таблица 1 – Исходные данные

Масса КА, кг	1200	Нижний предел изменения высоты РКО, км	390
Радиус Земли, км	6371	Срок активного существования КА, сут	1825
Радиус РКО, км	6771	Гравитационный параметр Земли, км ³ /с ²	398600
Радиус НКО, км	6621	Приращение скорости для схода с НКО спуска, км/с	0,150
Радиус НКО спуска, км	6521	Коэффициент учёта выбросов, незабора и остатка топлива	1,08
Верхний предел изменения высоты РКО, км	420	Конструктивная характеристика КДУ	15,41

В таблице 2 представлен протокол расчёта характеристической скорости. При расчёте времени снижения КА использовалась вспомогательная функция, зависящая от высоты полёта и индекса солнечной активности [3]. Протокол расчёта массы топлива и массы КДУ представлен в таблице 3, пары двухкомпонентного топлива были выбраны из справочника [4].

Таблица 2 – Расчёт характеристической скорости

N	Параметр	Величина
1	Большая полуось ПЭО, км	6696
2	Скорость в перигее ПЭО, км/с	7,803
3	Скорость на НКО, км/с	7,759
4	Приращение скорости для перевода с НКО на ПЭО, км/с	0,043
5	Скорость в апогее ПЭО, км/с	7,630
6	Скорость на РКО, км/с	7,673
7	Приращение скорости для перевода с ПЭО на РКО, км/с	0,043
8	Приращение скорости для изменения наклона орбиты, км/с	0
9	Вспомогательная функция (верхний и нижний пределы высоты)	1,493
		0,879

10	Баллистический коэффициент $KA \cdot 10^3$	2,102
11	Время снижения орбиты, <i>сут</i>	292,2
12	Число необходимых коррекций высоты орбиты	7
13	Корректирующий импульс, <i>км/с</i>	0,017
14	Приращение скорости для коррекции высоты орбиты, <i>км/с</i>	0,122
15	Большая полуось ПЭО спуска, <i>км</i>	6646
16	Скорость в апогее ПЭО, <i>км/с</i>	7,6
17	Скорость в перигее ПЭО, <i>км/с</i>	7,892
18	Скорость на НКО, <i>км/с</i>	7,818
19	Приращение скорости для схода с РКО на ПЭО спуска, <i>км/с</i>	0,072
20	Приращение скорости для схода с ПЭО на НКО спуска, <i>км/с</i>	0,073
21	Суммарная характеристическая скорость, <i>км/с</i>	0,504

Таблица 3 – Расчёт массы топлива и КДУ

	Окислитель	Горючее	Удельный импульс, <i>с</i>	Масса топлива, <i>кг</i>	Масса КДУ, <i>кг</i>
1	Кислород	Водород	428	146,6	156,7
2		Керосин	335	184,2	197,0
3		НДМГ	344	179,8	192,2
4		Гидразин	346	178,8	191,2
5		Аммиак	323	190,5	203,8
6	Азотный тетраоксид	Керосин	309	198,5	212,3
7		НДМГ	318	193,3	206,7
8		Гидразин	322	191,1	204,4
9	Фтор	Водород	449	140,1	149,8
10		Гидразин	402	155,5	166,2
11		Пентаборан	361	171,9	183,8

По результатам расчётов из таблицы 3 построен график на рисунке 1. По оси абсцисс за N указан номер пары двухкомпонентного топлива из таблицы 3, по оси ординат – масса топлива ($m_{\text{топл}}(A)$) и масса КДУ ($m_{\text{КДУ}}(A)$). A представляет собой вектор-столбец значений удельного импульса, соответствующий 4 столбцу таблицы 3.

Анализ полученных результатов по критерию минимальной массы показал, что наиболее оптимальными парами двухкомпонентного

топлива выступают кислород-водород, фтор-водород и фтор-гидразин. Однако при выборе конкретной пары двухкомпонентного топлива должны также соблюдаться эксплуатационные, экологические и экономические требования, что требует более глубокой проработки вопроса на дальнейших этапах проектирования КА.

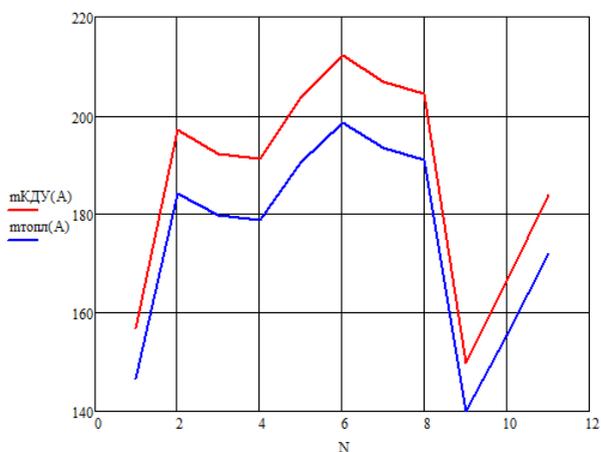


Рис. 1 – Зависимость массы топлива и массы КДУ от выбранной пары двухкомпонентного топлива

Литература:

1. Куренков, В.И. Методика выбора основных проектных характеристик и конструктивного облика космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие /В.И. Куренков, В.В. Салмин, А.Г. Прохоров - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 260с.

2. Уперчук Р.А., Сачук Д.В., Шулепов А.И. Разработка математической модели инспекции вышедших из строя спутников, движущихся по низким круговым орбитам / Р.А. Уперчук, Д.В. Сачук, А.И. Шулепов // Сборник тезисов докладов XLVI Международной молодёжной научной конференции "Гагаринские чтения". 2020. - С. 312-313.

3. Белоконов, И.В. Расчет баллистических характеристик движения космических аппаратов: учебное пособие [Текст] / И.В. Белоконов; Самар. аэрокосм. ун-т. – Самара., 1994. – 76с.

4. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей. Камеры / Д. И. Завистовский, В. В. Спесивцев. Учеб. пособие. —

Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2006. — 122 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д.Е. Хафизов, В.В. Казанцев, С.В. Ефремов
Томский Политехнический Университет,
г. Томск, deh5@tpu.ru

Массогабаритные показатели бортовой кабельной сети являются одним из важных параметров при проектировании космического аппарата. Оптимизация бортовой кабельной сети – один из наиболее перспективных путей уменьшения массы. В работе определен конструктивный элемент, который способен значительно уменьшить массу за счет снижения количества кабелей и проводов в космическом аппарате. Разработан план по определению оптимальных размеров и материалов, используемых при создании токопроводящих шин электропитания по технологии Bus Bar.

The weight and dimensions of the spacecraft onboard cable network are one of the important parameters in the design of satellites. Optimizing the on-board cable network is the most promising way to reduce weight. The work identified a structural element that can significantly reduce the number of cables and wires in the spacecraft. A plan has been developed to determine the optimal dimensions of the Bus Bar technology.

Технико-экономическое развитие современного мира не может происходить без влияния космической отрасли – различного рода космических аппаратов (КА).

За обеспечение взаимодействия оборудования и различных узлов КА отвечает бортовая кабельная сеть (БКС), состоящая из кабельно-проводниковой продукции. Массогабаритные показатели БКС значительно снижают величину полезной нагрузки относительно общего веса КА, что приводит к уменьшению затрат на миссию, что позволяет, в свою очередь увеличить функциональные возможности проектируемых КА. В связи с этим одной из основных задач при конструировании является уменьшение массы БКС без ухудшения работоспособности. [1]

Оптимизации массогабаритных показателей БКС можно достичь путем замены используемых кабелей и проводов на силовую шину электропитания, изготовленную по технологии Bus Bar. Применение силовых шин питания позволяет уменьшить вес БКС системы

электропитания КА до 45% за счет снижения массы токопроводящих элементов, а так же массы изоляционных материалов (рисунок 1). [2]

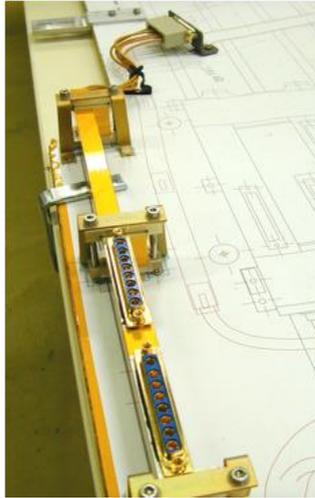


Рис. 1 - Силовая шина электропитания по технологии Bus Bar.

Поэтапное проектирование конструктивных элементов можно выполнить при помощи цифровизации изучаемого объекта, создания, так называемого, цифрового двойника, который представляет собой трехмерную имитационную модель силовой шины электропитания. Основываясь на эксплуатационные особенности работы: внешние воздействующие факторы, значения токовой нагрузки, условий теплообмена с окружающей средой – проводится построение геометрии модели программном пакете Comsol Multiphysics.

Использование именно этой среды позволяет с высокой точностью задать все параметры моделирования. Проводится построение геометрии цифрового двойника системы, задаются материалы – как для токопроводящего, так и для изоляционного элемента, граничные условия, а также сетка объекта, которая позволяет нам указать точность, с которой будут проводиться измерения. Поэтапное выполнение всех вышеперечисленных действий позволит получить наглядное изображение электрического, теплового и магнитного полей, а также изучить влияние силовой шины на окружающие ее объекты.

Изучение полученных полей, позволит дать рекомендации по выбору оптимальных конструкций силовых шин питания, что впоследствии окажет положительный эффект на массогабаритные

показатели космического аппарата, а также на массу полезной нагрузки и полезного оборудования, которую можно вывести на орбиту.

Достижение поставленных целей возможно при выполнении следующего ряда задач:

1. Построение трехмерных моделей в программной среде Comsol Multiphysics:

- 1.1. Определение конструктивных особенностей силовой шины;
- 1.2. Составление номенклатуры применяемых в бортовой кабельной сети материалов и выявление их электротепловых свойств;
- 1.3. Определение граничных условий, характеризующих внешние воздействующие факторы, которые оказывают влияние на бортовую кабельную сеть во время эксплуатации космического аппарата;
2. Оценка величин тепловых и электрических полей с учетом геометрических размеров, эксплуатационных нагрузок и внешних воздействующих факторов:

2.1. Получение электрических и тепловых полей для построенной трехмерной модели;

2.2. Объяснение полученных зависимостей;

3. Разработка рекомендаций по выбору оптимальной конструкции силовой шины электропитания:

3.1. Определение материалов токоведущей части;

3.2. Подбор материала изоляции.

Моделирование перспективных конструкций БКС на основе цифровизации объекта исследования позволит нам изучить особенности режимов работы силовых шин, а также выбрать оптимальную конфигурацию, соответствующую заданным токовым, тепловым и массогабаритным показателям.

Литература:

1. *Абламейко С.В.* Малые космические аппараты. – Минск: БГУ, 2012. – 159 с. – (Аэрокосмические технологии).

2. *Двирный В.В., Еременко Н.В., Двирный Г.В.* Уменьшение массы кабельной продукции для космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2015. – Т.16, №3. – С. 658 – 663.

СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Е.П. Чушкина, И.В. Хромова

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, chushkina_2000@mail.ru, xromova@corp.nstu.ru/

В работе описано влияние окружающей среды на системы терморегуляции человека в условиях низких температур. Исследовано распределение температур разных тканей в процессе охлаждения. Исследовано влияние окружающей среды на тепловые потери одного из расчётных элементов. Анализ получаемых результатов позволяет качественно и количественно оценить безопасное время нахождения в воде и воздухе. Результаты исследования могут быть полезны специалистам при проектировании систем жизнеобеспечения летательных аппаратов.

The article describes the influence of the environment on human thermoregulation systems at low temperatures. The temperature distribution of various tissues during cooling was studied. The influence of the external environment on the heat loss of one of the calculated elements is investigated. Analysis of the results obtained allows us to qualitatively and quantitatively assess the safe time spent in water and air. The results of the study can be useful for specialists in the design of life support systems for aircraft.

Моделирование биофизических процессов на сегодняшний день является актуальной задачей в области разработки и оптимизации элементов систем жизнеобеспечения, направленных на обеспечение теплового комфорта для человека в рамках системы «человек – тепловая защита – окружающая среда» и для разработки соответствующих средств защиты.

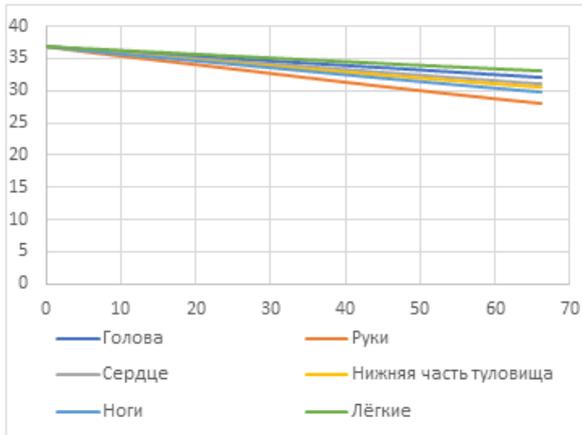
Целью настоящей работы является исследование влияния окружающей среды (вода и воздух) на системы терморегуляции человека (СТР).

Для моделирования работы системы термостабилизации человека применяется относительное деление объекта на «оболочку» – покровные ткани тела и «ядро» – внутренние органы и мышцы. Это многослойная многоэлементная модель, в которой каждая часть тела представлена расчетным элементом с соответствующим количеством и видом слоев. Кровеносная система работает совместно с системой терморегуляции и осуществляет перенос тепла от внутренних органов к поверхности тела.

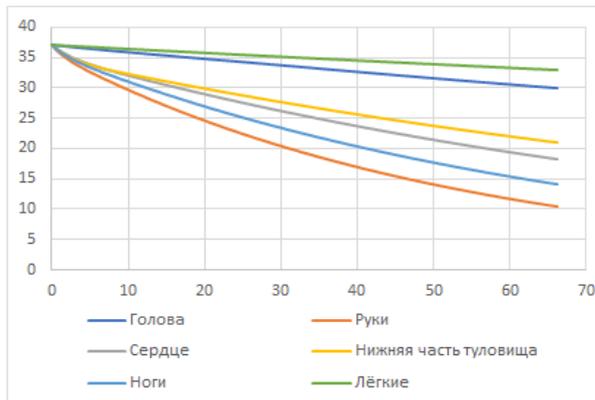
Предложенный подход позволяет рассчитать расход теплоносителя на расчетные элементы и оценить влияние переноса тепла между расчетными элементами и слоями на тепловые процессы в системе

«человек – тепловая защита – окружающая среда». В частности, проводятся исследования влияния температуры, давления и скорости среды.

В работе проводится исследование температуры разных тканей в процессе охлаждения в воздушной и водной среде при разной температуре. На графике (рис. 1) представлено распределение температур тканей при температуре окружающей среды 0°C для мужчины 30 лет.



а)



б)

Рис. 1. Температура разных тканей в процессе охлаждения: а) воздух; б) вода.

На рис. 1 видно, что в воде охлаждение происходит гораздо быстрее, чем в воздухе, причем быстрее всего остывают руки, ноги и грудная клетка. Это связано с различием в физических свойствах данных сред. Так как коэффициент теплопроводности воды больше коэффициента теплопроводности воздуха, то при одинаковых перепадах температур, коэффициент теплоотдачи в воде больше, то есть теплообмен происходит интенсивнее.

В работе также проводится исследование влияния давления и скорости среды на температуры, тепловые потери и их составляющие для расчетных элементов и слоев системы.

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. Курмазенко Э.А. Конструирование тепломассообменных аппаратов систем жизнеобеспечения: Учеб. пособие / Э. А. Курмазенко; Моск. авиац. ин-т им. Серго Орджоникидзе М.: Изд-во МАИ, 1991.
2. Пичулин В.С. Математическое моделирование и проектирование индивидуальных систем жизнеобеспечения экипажей космических аппаратов: Учеб. пособие. – М.: МАИ, 2001. – 88 с.
3. Чичиндаев А. В. Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур: монография / А. В. Чичиндаев, И. В. Хромова. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. - 214 с - (Монографии НГТУ). - 3000 экз. - ISBN 978-5-7782-3492-5.
4. I.V. Khromova, Heat Exchange in “Human body - Thermal protection – Environment System,” Journal of Physics: Conference Series, 2017. doi:10.1088/1742-6596/891/1/012084.
5. Березовский В.А. Колотилев Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
6. Катунцев В.П., Филипенков С.Н. / Тепловое состояние космонавтов при автоматическом регулировании теплосъема в период внекорабельной деятельности с борта международной космической станции // Медицина экстремальных ситуаций. – 2019. – 10 с.

СЕКЦИЯ КОНСТРУКЦИЯ И ДЕЙСТВИЕ СРЕДСТВ
ПОРАЖЕНИЯ И БОЕПРИПАСОВ

**ОБЗОР МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРОНИКАНИЯ УДАРНИКА В ТВЕРДОЕ ТЕЛО**

Т.Р. Адриашкина, А.В. Гуськов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, tadriashkina@gmail.com, a.guskov@gmail.com**

В данной работе проведен обзор некоторых методов процесса проникания ударника в твердое тело. Представленные ниже методы и модели позволяют оценить результаты соударения ударника с разными видами преград, возможность разрушения преграды и выхода фрагмента ударника за ее пределы, непосредственно определить параметры откольного разрушения. Поскольку процессы, связанные с прониканием, очень сложны, вполне естественно, что большая часть исследований в этой области ведется экспериментальными методами. Для моделирования соударения ударника с преградой требуется знание свойств материалов во всем диапазоне скоростей деформаций, характерных для условий соударения.

This article reviews methods for the process of penetration of a striker into a solid. Presented below methods and models allow to evaluate the results of collision of projectile with different types of obstacles, the possibility of destruction of obstacles and the release of a fragment of the drummer beyond, to directly determine the spall parameters. Since the processes associated with penetration are very complex, it is natural that most research in this area is conducted by experimental methods. Modeling the impact of an impactor with an obstacle requires knowledge of the properties of materials over the entire range of strain rates characteristic of the impact conditions.

1. Численные анализ экспериментальных методик

Наиболее простая модель пробивания преграды строится на балансе кинетической энергии E_k ударника и работы $A_{\text{деф}}$ деформации и разрушения преграды. При пробивании общая кинетическая энергия E_k в основном идет на пластическую деформацию среды $A_{\text{деф}}$ и обеспечение запреградной скорости фрагмента ударника W . В рамках этой модели определяется запас прочности по непробиваемости преграды:

$$K_E = \frac{A_{\text{деф}}}{E_k} > 1$$

Кинетическая энергия определяется через массу m и скорость V ударника как $E_k = \frac{mV^2}{2}$.

E_k расходуется на преодоление сил сопротивления преграды, деформацию и разрушение ударника, нагревание преграды и ударника, а также на сообщение ударнику скорости W при пробивании тонких преград.

Работа $A_{\text{деф}}$ включает в себя работу изгиба и среза. Механизм разрушения и соотношение долей работы среза и изгиба меняется в зависимости от материала, толщины слоя, размеров ударяющего в него ударника. Полную энергию, поглощенную средой в процессе пластических деформаций при расширении пробивного отверстия, рассчитывают по формуле Томсона:

$$A_{\text{деф}} = \pi d^2 H \left[\frac{1}{2} \sigma + \rho \left(\frac{Vd}{L} \right)^2 \right]$$

где d - калибр ударника, м; H - толщина пробиваемого слоя преграды, м; σ - предельное напряжение для среды, МПа; ρ - плотность среды, кг/м³; V - скорость ударника, м/с; L - длина головной части ударника, м.

Запреградную скорость ударника W рассчитывается по экспериментально уточненной формуле:

$$W = \alpha (V^p - W_{\text{псп}}^p)^{1/p}$$

здесь p - параметр, зависящий от угла Θ подхода ударника к преграде, α - зависит от механизма разрушения преграды при пробитии по типу прокалывания ($\alpha = 1$); $W_{\text{псп}}$ - минимально необходимая скорость сквозного пробития преграды, м/с, она определяется по универсальной формуле Жакоб де Марра:

$$W_{\text{псп}} = \frac{K(d^{0,75} * H^{0,7})}{m^{0,5} \sin \theta}$$

где K - коэффициент сопротивляемости брони, устанавливается в соответствии с типом брони (для гомогенной и мягкой брони $K = 1500 \div 2000$, для гетерогенной и жесткой брони $K = 2000 \div 3000$).

Относительно данных расчетных формул проводился численный метод исследования преград из стальных и алюминиевых сплавов, которые показали, что пробитие по типу прокола реализуется при обстреле ударниками тонких преград и сопровождается небольшим изгибом самой пластины [1]. Обстрел мишеней из конструкционных сталей средней и низкой прочности дает деформационную картину в области проникания ударника в виде пролома без изгиба пластины. В интервале толщин 8-12 мм реализуется механизм деформирования в виде выпучины с отрывом или без отрыва откольного слоя в локальной зоне взаимодействия ударника с преградой.

Таким образом, с некоторой погрешностью был сделан вывод о том, что кинетическая энергия практически вся идет на деформацию преграды

и запреградный эффект, небольшая оставшаяся часть (около 10%) затрачивается на упругий удар.

Нет единого метода, который опишет все подходы при внедрении, так как материалы преград и ударника сами по себе могут иметь разные физические свойства. При внедрении ударника практически всегда формируется упругая, упругопластическая область и гидростатическое ядро, но пространственное распределение этих областей зависит от физико-механических свойств материала. [2] и [3].

2. Методы регистрации параметров проникания ударника в твердую среду

При проведении экспериментальных исследований проникания твердых тел в прямых экспериментах чаще всего проводят измерения таких параметров процесса, как зависимость глубины проникания ударника от времени, конечной глубины внедрения, скорости проникания и ускорения (замедления) проникающего тела. Для этого используются различные датчики, размещенные в мишени, высокоскоростная киносъемка процесса проникания, многокадровая рентгеноимпульсная съемка, интерферометрические методы измерения скорости внедрения и акселерометрия.

Для измерения перемещения во времени тела, проникающего в сухой песок, У. Аллен в своей работе [4] использовал метод рам-мишеней, хорошо известный из экспериментальной аэродинамики. В качестве мишени использовался сухой песок с размером зерна около 1 мм. Внутри контейнера находились рамы-мишени с натянутыми медными проволочками на расстоянии 10 см друг от друга. Ударник представлял собой цилиндр с оголовком в виде конуса диаметром 12,7 мм. Выстрелы проводились из гладкоствольного порохового разгонного устройства вдоль оси контейнера поперечным сечением 30,5х30,5 см и длиной 3,66 м. При движении в грунтовой среде ударник поочередно разрывал проволочки на рамах, и регистрирующая аппаратура фиксировала моменты времени прохождения ударником соответствующего сечения. В результате была получена зависимость глубины внедрения от времени.

Аналогичный метод применил при исследовании наклонного проникания Д. Мэйнард [5]. В эксперименте около десяти сеток устанавливалось вдоль траектории движения снаряда. При движении в грунте снаряд последовательно разрывал электрические цепи сеток, формируя отметки времени. Применение сеток позволило производить замеры начальной скорости удара, скорости движения снаряда внутри мишени, остаточной скорости.

3. Численное моделирование

Во многих исследованиях проводилось тестирование разработанных методик численного моделирования на качественное и количественное соответствие параметрам моделируемого процесса, а также бесспорным физическим соотношениям.

С этой целью решены задачи об ударе стального цилиндра по жесткой стенке, о сквозном пробитии сферическим ударником однородных двухслойных преград, о глубоком внедрении сердечников винтовочных пуль в полубесконечные алюминиевые преграды и множества других.

В исследовании [6] представлены результаты численного моделирования взаимодействия ударников с преградами, с целью выявления и прогнозирования их поражающих способностей, а также возможного проектирования пуль с заранее заданными характеристиками.

Прототипами рассматриваемых ударников А1-А6 (рис. 1) являются 9 мм пули пистолетных патронов, массы которых лежат в диапазоне от 3.5 до 10.2 г, начальные скорости от 300 до 470 м/с, а также пистолетные резиновые пули травматического действия.

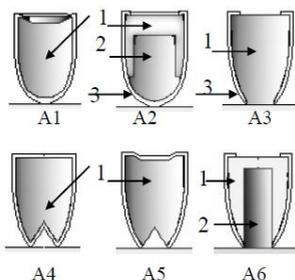


Рис. 1 – Типы ударников А1-А6:

1- Свинцовая часть, 2 – стальной сердечник, 3- стальная оболочка.

В ходе эксперимента выяснилось, что наибольшим экспансивным эффектом, выражающимся в данном случае, в наименьшей запреградной скорости, обладают А5 затем А4. Наибольшие пробивные возможности у А6, затем у А2. Пробивные и экспансивные качества других ударников располагаются в интервале между аналогичными качествами выше отмеченных пуль.

Литература:

1. *Вишнев О.Ю.* Деформирование и разрушение слоистых композиционных материалов со сложноорганизованной структурой при

ударно-волновых нагрузках//Прикладная математика и вопросы управления. 2011.

2. Ерышева Т. А., Гуськов А. В., Милевский К.Е. Исследование упруго-пластической деформации при внедрении шарового индектора//Решетневские решения.

3. Арнышева О. В., Гуськов А. В., Милевский К.Е. Исследование внедрения шарового индектора в упруго-пластическое пространство//Решетневские решения.

4. Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок//Механика. Сб. переводов. М.:ИЛ.№6, 1957г., С.125–137

5. Maunard D.K. Projectile impact and penetration dynamics – correlation of analytical and experimental results//Proc. Int. Conf. Fract. Mech. And Technol., Hong Kong, 1977, vol. 2, Alphen van den Rijn, 1977, pp.1329-1342.

6. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Исследование взаимодействия комбинированных ударников с преградами//Химическая физика и мезоскопия, 2005.– Т.7, –№ 3, С. 251-258.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ АГЛОМЕРАТОВ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА В ВОЗДУХЕ

Н.С. Белоусова^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт химической кинетики и горения им. В. В.

Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, nata.bel.94@mail.ru

Проведено исследование горения агломератов алюминия и титана диаметром 220–550 мкм в свободном падении в воздухе. При помощи видеосъёмки определены времена горения частиц, времена начала и окончания фрагментации, закономерности движения частиц, в частности, их скорость и координата в момент начала и окончания фрагментации.

The study of the aluminum and titanium agglomerates combustion with 220–550 μm diameter in free fall in air was carried out. With the help of video filming, the particles burning times, the fragmentation beginning and the ending times, the particles motion laws, particular, their speed and coordinate at the moment of the fragmentation beginning and the ending were determined.

Алюминий и титан являются самыми распространенными конструкционными материалами [1, 2], которые применяются во многих технических объектах. Оба металла являются пирофорными, высококалорийными материалами, что обуславливает большой интерес к изучению процессов горения этих металлов и их соединений. Для более

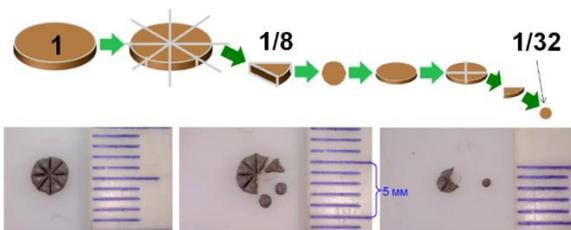
полного понимания процесса горения частиц этих металлов, необходимо знать особенности параметров горения и фрагментации каждого.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем:

- использовался образец, состоящий из безметалльного топлива-матрицы, в которую помещалось определённое количество частиц (титановые включения или алюминиевые агломераты);

- образец наносился на кварцевую трубку диаметром 12 мм (она играла роль держателя образца). Размеры матрицы W×L×Н примерно 3×30×2 мм. В волне горения матрицы каждый фрагмент превращается в горящую частицу-агломерат. Дальнейшее горение частиц происходит в воздухе. Способы обработки экспериментов были в основном аналогичны методике [3, 4].

Схема приготовления частиц-включений для алюминия изображена на рисунке 1.



Вверху – схематическое изображения этапов частиц;

Внизу – реальные фотоснимки отдельных стадий процесса деления порции вещества.

Рис. 1.Схема приготовления частиц-включений заданной массы.

Включения титана представляли собой монолитные миниатюрные кусочки, изготовленные следующим образом [5]. От слитка металлического титана (чистота 99.38 %) бокорезами откусывали фрагмент размером 2–3 мм. Фрагмент расплющивали на титановой наковальне титановым молотком, затем прокатывали на стальных вальцах до толщины 50–80 мкм. В результате получали плоский титановый «лепесток», рисунок 2, от которого затем ножницами отрезали требуемое количество кусочков (обычно 10) для размещения их в одном образце (в лунках на полоске матрицы).

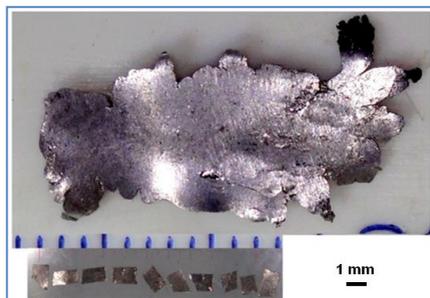


Рис.2. Титановый «лепесток» и отрезанные от него частицы-включения для одного опыта.

Эксперименты проводили следующим образом, кварцевую трубку-держатель образца закрепляли горизонтально на высоте 2,5-3 м таким образом, чтобы полоска матрицы находилась на нижней стороне трубки. В ходе эксперимента производили видеосъемку падающих горящих частиц с частотой 25 или 500 кадров в секунду. Сбор продуктов сгорания осуществляли с использованием большого (80×100 см) поддона из мелованной бумаги формата А₀ –применяли для сбора крупных остатков горения материнских частиц в случае их падения с высоты более 2 м.

Во время обработки видеозаписи для частиц были определены характерные времена начала фрагментации, окончания фрагментации, окончания горения, закономерности движения частиц, в частности, их скорость и координата в момент начала фрагментации.

Увеличенные участки видеogramмы иллюстрируют процесс фрагментации алюминиевых и титановых частиц (рисунки 3 и 4). Алюминий в отличие от титана [6], в процессе горения фрагментирует мало и проявляется это в единичных «отстрелах» фрагментов.



Рис.3 Видеogramма – последовательность кадров горения частицы Al

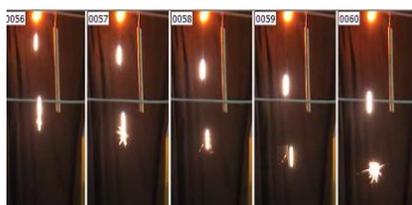


Рис.4. Видеogramма – последовательность кадров горения частицы Ti

Отобраны и исследованы конденсированные продукты горения частиц (рисунки 5 и 6). Все частицы сгорания подвергали гранулометрическому анализу с применением подходящих методов с построением изображения. Применяли макросъемку, оптическую и электронную микроскопию.



Рис.5 Продукты сгорания Al двух морфологических типов

а – полностью выгоревшие агломераты – крупные оксидные частицы без видимых вкраплений металла;
 б – невыгоревшие частицы оксида.

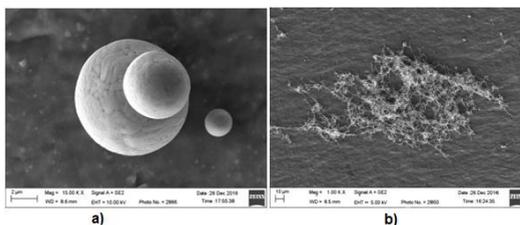


Рис. 6 Продукты сгорания частиц титана
 а – сферические остатки материнских частиц с размерами до сотен микрон; б – сферические частицы оксида с размерами единиц-десятков микрон; с – объекты со структурой аэрогеля с габаритным размером до тысячи микрон.

Все частицы сгорания подвергали гранулометрическому анализу с применением подходящих методов с построением изображения. Применяли макросъемку, оптическую и электронную микроскопию.

Таким образом, в результате проделанной работы, были выявлены основные закономерности горения в свободном падении крупных частиц алюминия титана. Были определены характерные времена горения, типы и условия фрагментации горящих металлических частиц, а также проведен анализ продуктов горения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 20-33-90208).

Литература:

1. *Зубков Л.Б.* Космический металл. Все о титане. М.: Наука, 1987. 129 с.
2. *Шидловский А.А.* Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 280 с

3. Белоусова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В. Исследование горения частиц титана, с целью генерации наночастиц TiO₂// В сборнике: XV Всероссийская научная конференция «Проблемы проектирования и производства систем и комплексов». –Тула, 2018, №11 –С. 90-99.

4. Глотов О. Г., Суродин Г. С., Житницкая О. Н., Кискин А. Б. Горение монодисперсных агломератов из алюминия и бора в воздухе // Тезисы докладов IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», Новосибирск, Россия, 16-18 ноября 2015, С. 46.. ISBN 978-5-89017-042-2

5. Belousova, O. G. Glotov, A. V. Guskov // Study of the free falling particles trajectory at the burning monolithic titanium particles / N. S. // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - Vol. 1214. - Art. 012010 (7 p.). - DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012010

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ КУМУЛЯТИВНОГО СТРУЕОБРАЗОВАНИЯ

Е.М. Гриф

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, grif.2015@stud.nstu.ru**

Рассматривается процесс кумулятивного струеобразования согласно гидродинамической теории кумуляции. Проводится численный расчет осесимметричного кумулятивного заряда. Анализируются расчетные данные геометрического распределения металла кумулятивной облицовки.

The process of cumulative jet formation according to the hydrodynamic theory of cumulation is considered. A numerical calculation of an axisymmetric shaped charge is carried out. The calculated data of the geometric distribution of the cumulative lining metal are analyzed.

Механизм формирования кумулятивной струи, основанный на модели идеальной несжимаемой жидкости и учитывающий экспериментальные данные, развит независимо М. А. Лаврентьевым и Г. Биркхоффом [1].

Процесс кумуляции протекает следующим образом (см. Рис. 1):

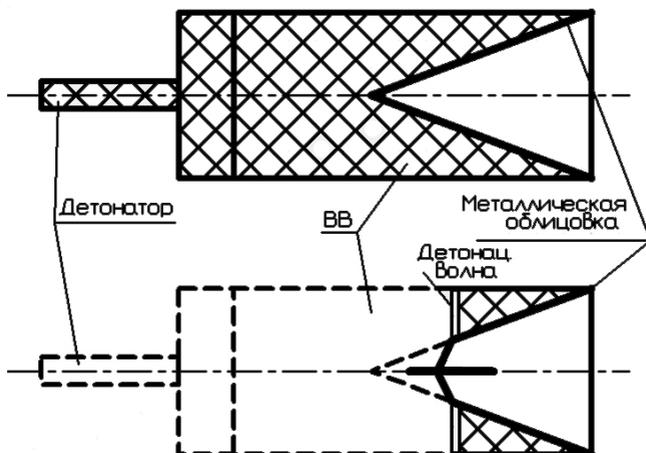


Рис. 1 – Процесс функционирования кумулятивного заряда

Согласно гидродинамической теории кумуляции, давление при взрывном обжиге кумулятивной облицовки так велико, что прочностные характеристики металла ничтожны, поэтому материал облицовки можно принять за идеальную жидкость. Позади вершины кумулятивной облицовки находится область всестороннего сжатия конуса, которая включает в себе только внешний металл конуса. Внутренняя часть облицовки, преобразованная в струю, выдавливается из вершины конуса и затем движется с большой скоростью вправо. Другими словами, материал облицовки делится на две части с разделяющей поверхностью, лежащей где-то между внутренней и внешней частями первоначального конуса. Из металла внешней части облицовки формируется кумулятивный пест, который движется вправо с относительно небольшой скоростью (500...1000 м/с), а из металла внутренней части облицовки – струя, которая перемещается вправо вдоль оси с очень большой скоростью (2000...10000 м/с) [2].

Исследования поведения металла кумулятивных облицовок обычно проводятся экспериментально, так как строгое и полное описание поведения реальных металлов при деформировании вызывает определенные трудности, однако возможности современных сред численного моделирования позволяют исследователям более детально изучить явления, протекающие в процессе кумулятивного струеобразования [3]. Например, задачи о геометрическом распределении материала в процессе кумулятивного струеобразования.

С помощью среды численного моделирования быстротекающих динамических процессов Ansys AUTODYN проведен расчет

функционирования осесимметричного кумулятивного заряда, на внутренней части кумулятивной облицовки которого установлены датчики (см. Рис. 2). Моделирование проводится в 2-D пространстве, симметрия аксиальная, основные уравнения решаются методом Эйлера [4].

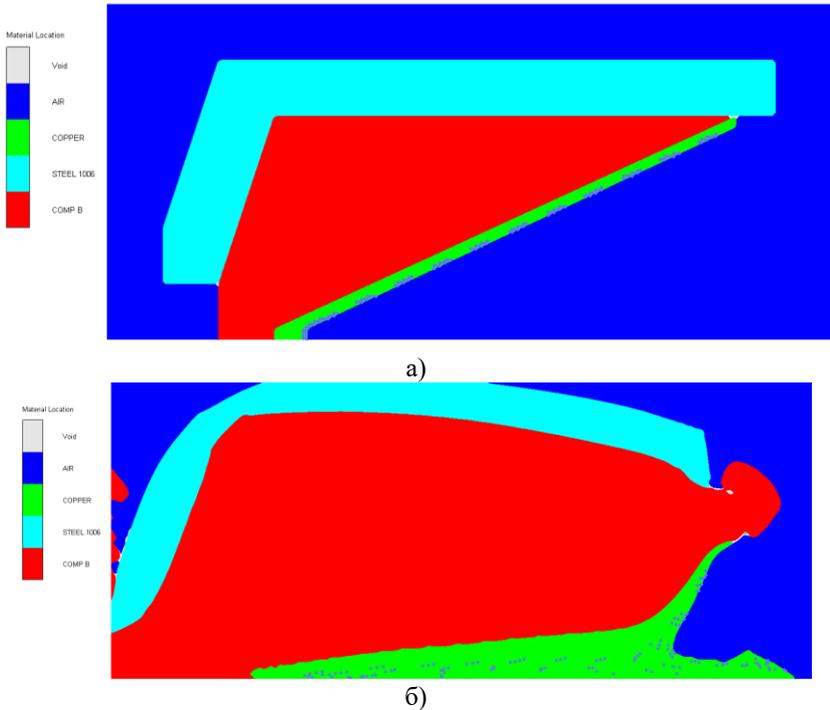


Рис. 2 – Численный расчет процесса кумулятивного струеобразования:
а) $t=0$ мкс, б) $t=1,5$ мкс

Согласно расчетной картине, часть металла внутренней части кумулятивной облицовки действительно формирует кумулятивную струю. Однако значительная его часть уходит на формирование кумулятивного песта. Этот факт противоречит известным данным о процессе кумулятивного струеобразования: при размере расчетной ячейки $h=250$ мкм, меньшем толщины струеобразующего слоя (порядка $h=300$ мкм), весь выделяемый объем металла должен был уйти в кумулятивную струю. Противоречивость наблюдаемого явления является стимулом для дальнейших исследований геометрического

распределения материала кумулятивных облицовок при взрывном обжати.

Исследования геометрического распределения металла в процессе кумулятивного струеобразования с помощью современных средств численного моделирования позволяют выделить детали, которые невозможно получить при экспериментальных исследованиях. Данные, полученные в результате численного расчета, противоречат известным и являются стимулом для дальнейших исследований геометрического распределения материала кумулятивных облицовок при взрывном обжати.

Литература:

1. Воеводка А., Витковски Т. Моделирование формирования струи в линейных кумулятивных зарядах // Физика горения и взрыва. - 2014. - Т. 50, № 3. - С. 130-136.

2. Кумулятивное струеобразование : лабораторный практикум для 4 курса ФЛА (специальности 171400, 330500, 120400) дневной формы обучения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Мишнев В. И., Гуськов А. В., Милевский К. Е., Тришин Ю. А.] - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 40 с.

3. Гриф Е. М. Кинематика процесса образования кумулятивной струи / Е. М. Гриф, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике : 9 междунар. конф., посвящ. 120-летию академика М. А. Лаврентьева, Новосибирск, 7–11 сент. 2020 г. : тез. докл. – Новосибирск : Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2020. – С. 185. - 200 экз. - ISBN 978-5-94671-033-6.

4. Гуськов А. В. Влияние микроструктуры металла на процесс струеобразования = Influence of the metal microstructure on the jet formation process / А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. М. Гриф // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering industry. - 2019. – Т. 19, № 4. – С. 2

МЕТОДЫ СЕГМЕНТАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Зубашевский¹ К.М., Стояновский² О.И.

¹Новосибирский государственный технический университет,

zubaschewsky@vandex.ru

² Конструкторско-технологический филиал Института
гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

В работе рассмотрены основные методы сегментации элементов АЭС, подлежащих выводу из эксплуатации, в частности, отработанных тепловыделяющих сборок из радиоактивных материалов. Описаны методы лазерной, плазменной, фрезерной, гильотинной резки и резки сабельной пилой. На основании самого низкого количества выбросов загрязняющих веществ в процессе резки выделен метод гильотинной резки, как наиболее безотходный, а также производительный.

In this paper the main methods of decommissioned nuclear plants elements are described, particularly of spent heat assemblies made from radioactive materials. The laser, plasma, milling, reciprocating saw and guillotine cutting methods are described. Basing on the lowest pollutant blowout during cutting process the guillotine cutting method was selected as the most wasteless and efficient.

Атомные электростанции (АЭС) являются одним из наиболее экологичных видов электростанций – они не выделяют большое количество дыма, сажи и шлака, как тепловые электростанции, не изменяют гидрогеологические условия местности, как это происходит при строительстве гидроэлектростанций. Однако, АЭС присущи собственные недостатки, самый значительный из которых – радиоактивные отходы, образующиеся после выработки радиоактивным топливом своего полезного ресурса. Кроме того, в процессе работы происходит сильное радиоактивное загрязнение оборудования и материалов, которые не только находятся в непосредственно контакте с топливом, но и на достаточном для распространения радиации расстоянии от источников излучения.

Радиоактивные отходы АЭС образуются от двух источников – отработанного ядерного топлива, и выведенных из эксплуатации конструкций самой электростанции.

Существуют различные методы утилизации этих отходов, но перед непосредственно утилизацией необходимо привести отходы к требуемому размеру, так как для каждого способов утилизации существуют свои требования к параметрам утилизируемого материала. Самый распространенный метод утилизации – захоронение, когда радиоактивные материалы помещают в специальные контейнеры, которые затем располагают в местах захоронения. Это делается с целью

возможного использования этих материалов в будущем, так как пока не существует технологий, позволяющих в полной мере использовать радиоактивные отходы, а также способ захоронения наиболее простой по сравнению, например, со сжиганием в плазме.

Если топливная сборка из тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) имеет примерно постоянные геометрические характеристики, то конструкционные элементы АЭС обладают очень неоднородной сложной геометрией – различно ориентированные трубы разных диаметров и толщины стенок, профильные элементы, плоские части. Все это требует не только разных режимов резки и разделения, но и разных технологических процессов переработки, начиная от простого механического демонтажа, заканчивая лазерной и плазменной резкой.

В работе проводится обзор некоторых методов сегментации радиоактивных отходов, состоящих из отработанного топлива и вышедших из эксплуатации конструкционных элементов АЭС.

Одними из наиболее распространенных способов измельчения радиоактивных отходов являются механическая резка фрезами, пилами, ножами, а также лазерная и плазменная резка. Рассмотрим некоторые примеры подробнее.

В [1] описан демонтаж АЭС с применением плазменной резки реактора в воде. Основной недостаток этого способа – высокая цена, составившая 6,9 млн долларов. Хотя сейчас стоимость плазменной резки значительно уменьшилась, тем не менее, этот способ является одним из дорогостоящих. Наряду с денежными затратами при плазменной резке образуется большое количество продуктов этой резки, как правило, в газообразном или пылеобразном состоянии, что способствует загрязнению окружающего пространства.

В работе [2] описан метод одно- и двухпроходной лазерной резки металлических труб, применяемых в АЭС. Этот метод позволяет разрезать трубы диаметром от 60 до 170 мм и толщиной стенки от 1,5 до 11,1 мм на произвольные части, однако требует сложных устройств как для работы самого лазера, так и для его координации в зоне резки. Однако этот метод очень хорошо подходит именно для сегментации труб, так как при резке лазером практически не происходит деформации самих труб, что позволяет избежать фрагментов нежелательной формы. При механических способах резки тонкостенных труб большого диаметра либо произойдет смятие трубы, либо потребуется дополнительная операция ее прессования для сохранения расчетной формы, кроме того, при резке пилой или фрезой может произойти заклинивание рабочего инструмента. В процессе лазерной резки, как и плазменной, образуются газообразные продукты горения, также являющиеся радиоактивными

материалами и требующие дополнительных затрат на нейтрализацию их действия.

Работа [3] предлагает несколько иную конструкцию установки, где резка производится сабельной пилой. Здесь операция резки происходит над технологической шахтой, из которой подается длинномерное изделие, в т.ч. пеналы с графитом, трубы, управляющие системы и т.д. Так как предложенный способ не предполагает перемещения радиоактивных материалов в обслуживаемые персоналом помещения, значительно уменьшается возможность облучения рабочего персонала. Этот метод применялся при выводе из эксплуатации Белоярской АЭС. Недостаток метода – образование радиоактивной стружки, которая дополнительно загрязняет пространство.

В [4] описана установка для разрезания отработавшей топливной сборки (ОТВС), где операция сегментации осуществляется с помощью фрезерно-отрезного станка (рисунк 1). Как и у всех методов с применением подобного режущего инструмента, главный недостаток, особенно критичный для радиоактивных материалов – образование стружки, которая загрязняет окружающее пространство. В рассмотренной работе эта проблема решена осуществлением работы установки в воде, что позволяет снизить уровень загрязнения, однако повышает трудоемкость процесса.

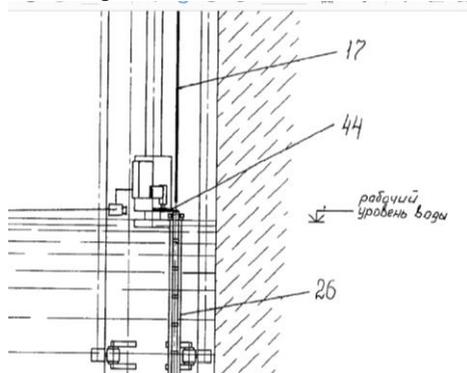


Рис. 1. Схема резки фрезой: 44 – фрезерно-отрезной станок, 26 – ампула с ТВЭЛами.

Более производительный метод описан в [5]: сегментация выполняется с помощью режущих ножей специальной формы (рис. 2), что позволяет резать ОТВС без предварительной подготовки (разборка ОТВС до отдельных ТВЭЛов, прессование ОТВС для придания сечения необходимой формы). При такой резке не образуется

радиоактивных частиц, которые дополнительно загрязняют рабочее помещение. Основные преимущества данного способа – отсутствие побочных продуктов процесса (стружки, пыли), высокая производительность процесса, простая схема работы устройства, что облегчает его обслуживание и снижает стоимость по сравнению с некоторыми другими методами.

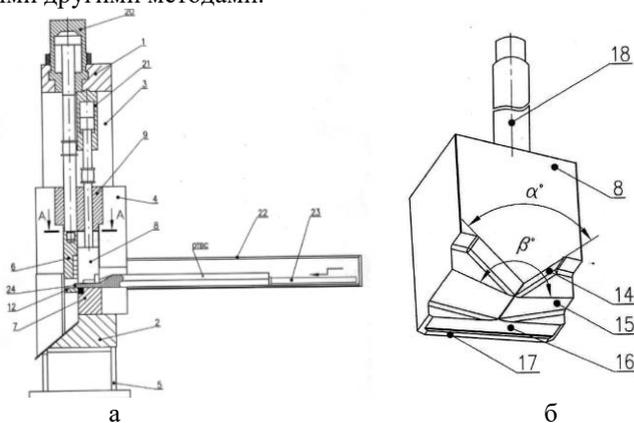


Рис. 2. Установка для гильотинной резки ОТВС: а – общая схема установки, б – режущий инструмент.

Все описанные методы предполагают удаленное от человека выполнение операций, что является необходимым требованием для устройств подобного рода.

Наиболее экологичным методом из описанных является способ гильотинной резки ОТВС ножами, который обладает рядом и других преимуществ перед остальными. Кроме того, этот метод один из немногих, активно применяемых в России. При дальнейшей работе в области сегментации ядерных отходов авторы данной работы планируют осуществление модернизации этого метода резки, которая будет направлена на увеличение ресурса работы всей установки.

Литература:

1. ELK RIVER REACTOR DISMANTLING, ELK RIVER, MINNESOTA. Environmental Statement. United States: N. p., 1972. Web. doi:10.2172/4638702.
2. Khan A., Hilton P. Single-sided laser tube cutting for nuclear decommissioning applications // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. – 2010. – P. 270-276.

3. Установка для разделки длинномерных радиоактивных изделий на фрагменты: патент 2545512 Российская Федерация: МПК G 21 C 19/00 Берела А. И., Егоров С. Н., Роменков А. А., Туктаров М. А., Уфаев Н. Н., Федотов А. Г., Ярмоленко О. А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Ордена Ленина научно-исследовательский и конструкторский институт электротехники им. Н. А. Доллежала». – № 2013151248/08 заявл. 18.11.2013, опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10 – 11с.

4. Способ и установка для разделки отработавшей топливной сборки ядерного реактора: патент 2208849 Российская Федерация: МПК G 21 C 19/37 / Божко А. Г., Винников А. И., Дмитриев А. П., Шишкин В. А., Матвеев П. С., Савельева И. Н., Щуров Л. И., Марков В. В., Романов В. Г.; заявитель и патентообладатель «Центральное конструкторское бюро машиностроения». – № 2001109173/06 заявл. 05.04.2001, опубл. 20.07.2003 – 16с.

5. Установка для резки отработавших тепловыделяющих сборок: патент 2732279 Российская Федерация: МПК G 21 C 19/00 / Галуцкий В. Г., Котов И. М., Ляхов В. В., Черендин А. Ф.; заявитель и патентообладатель фед. гос. бюджет. учрежд. науки «Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН». – № 2019132770, заявл. 15.10.2019, опубл. 15.09.2020, Бюл. №26 – 11 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ФРАГМЕНТАЦИИ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ

Н.С. Иванников, Е.Ю. Потанина, Е.Я. Брагунцов
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, elenopotanina@gmail.com, n1kivann@yandex.ru

В статье исследуются причины распада струи на множество фрагментов в процессе полёта. С помощью пакета прикладных программ ANSYS Autodyn показано, что причиной фрагментации является немонокотное распределение скорости вдоль струи, вызывающее местные локальные перенапряжения.

the article investigates the causes of jet disintegration into multiple fragments during flight. Using the ANSYS Autodyn application software package, it is shown that the cause of fragmentation is a non-monotonic velocity distribution along the jet, which causes local overtensionesses.

Явление кумуляции хорошо описано в рамках гидродинамической теории кумуляции, однако ряд явлений, происходящих в процессе кумуляции в рамках гидродинамической теории, не имеют объяснений [1-4].

В частности, неизвестны причины появления пульсационных возмущений, вызывающие распад струи на множество фрагментов.

При растяжении струи по всей её длине возникает множество шеек, по которым происходит разрушение струи на отдельные элементы. Это позволяет сделать вывод о формировании в струе в момент ее образования локальных периодических воздействий (возмущений). Вследствие чего в некоторых частях струи возникают локальные периодические напряжения. Развитие напряжений во времени приводит к локальной пластической деформации и как следствие к распаду струи на фрагменты. Причины появления прогрессирующих периодических возмущений до сих пор не выявлены.

В работе [1], предполагается, что множественная фрагментация струи обусловлена ударно-волновыми процессами, имеющими место на стадии обжатия облицовки. Известно, что скорость движения внешней и внутренней поверхности облицовки в процессе взрывного обжатия увеличивается скачкообразно (немонотонно), в соответствии с периодическим прохождением ударных волн и волн разрежения.

Данная работа посвящена более подробному исследованию причин фрагментации кумулятивной струи с помощью программной среды ANSYS Autodyn.

С этой целью спроектирован модельный кумулятивный заряд, который приведён на рисунке 1.

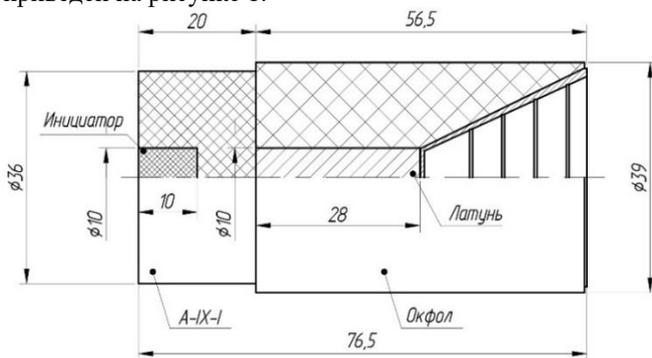


Рисунок 1. Кумулятивный заряд

Особенностью заряда являются:

- заряд двухшашечный: первый - А-IX-I, а второй - Окфол;
- наличие линзы, изготовленной из латуни, для обеспечения симметризации детонационного фронта при подходе к кумулятивной облицовке;
- облицовка с переменной толщиной стенки (см. рисунок 2);

На внутренней конической поверхности облицовки выполнено несколько выемок (маркеров), с помощью которых осуществлялся замер скорости участков кумулятивной струи при проведении натурального эксперимента.

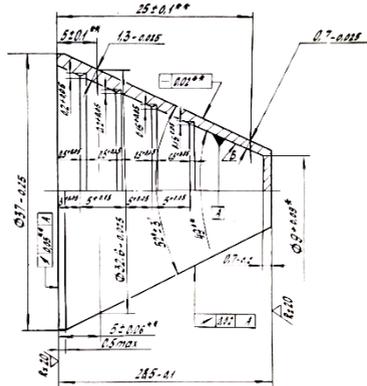


Рисунок 2. Чертёж кумулятивной облицовки

Данный кумулятивный заряд был поставлен в программной среде ANSYS Autodyn (см. рисунок 3), где под номерами 1-4 расставлены лагранжьевые датчики, размещённые в выемках, с помощью которых рассмотрим скорости участков струи. Детонация производилась по всей площади инициатора.

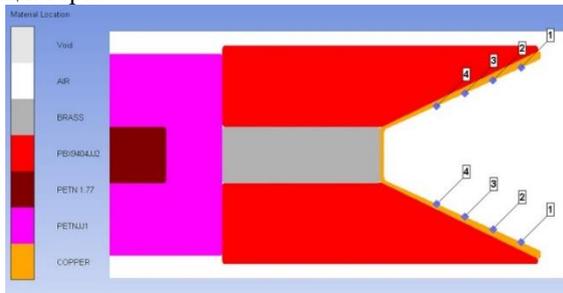


Рисунок 3. Постановка задачи

Численным методом исследовались процессы обжатия облицовки и растяжения кумулятивной струи кумулятивного заряда изображенного на рисунке 1. Расчёт производился с точностью 3 ячейки на миллиметр.

Результатом расчёта послужило распределение скоростей отмеченных участков (см. рисунок 4)

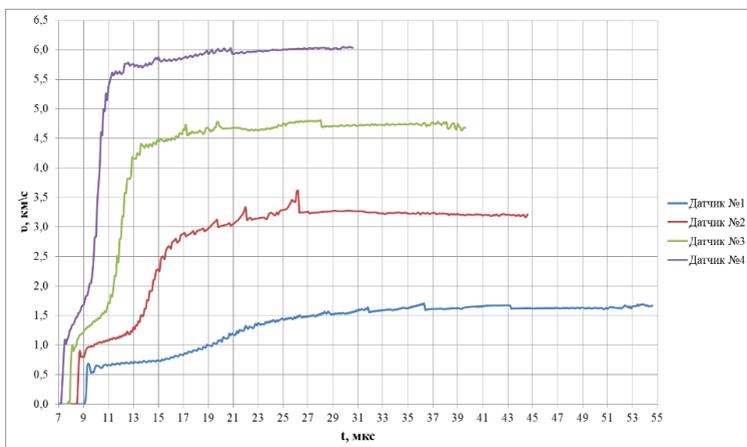


Рисунок 4. Графики изменения скорости участков струи

Из графиков на рисунке 4 хорошо видны относительно высокоамплитудные пульсации на каждом из участков.

Наличие этих колебаний отражается на целостности самой струи (см рисунок 5).

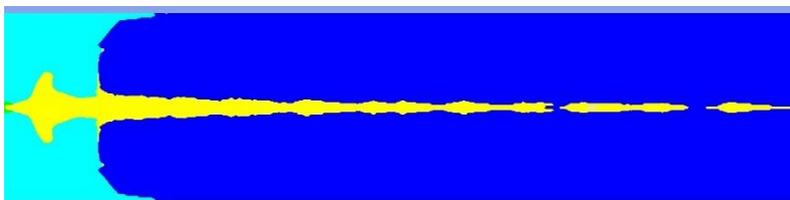


Рисунок 5. Фрагментация струи (46 мкс)

В качестве примера для сравнения на рисунке 6 приведён характер диспергирования струи, наблюдаемый в эксперименте [2].

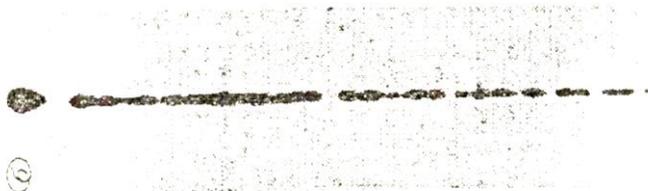


Рисунок 6. Рентгенограмма растягивающейся высокоградиентной медной КС лабораторного 50-мм КЗ (160 мкс) [2].

Исходя из результатов численного моделирования модельного кумулятивного заряда, можно сделать вывод о том, что вследствие скачкообразного поведения скорости обжатия облицовки скорости вдоль струи также имеет скачкообразный (немонотонный) характер. Следовательно, периодически возникают области больших скоростей деформаций и более высоких растягивающих напряжений, что является причиной множественной фрагментации.

Литература:

1. В.М. Фомин, В.И. Звягинцев, Е.Я. Брагунцов. «Особенности растяжения и разрушения кумулятивных струй»// Журнал «Прикладная механика и теоретическая физика» №2, Т. 61, с. 19-30, 2020.

2. Физика взрыва: В 2 т. / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 2.

3. Фомин В.М. Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников, И.И. Шабалин, В.А. Бабаков, В.Ф. Куропатенко, А.Б. Киселёв, Ю.А. Тришин, А.И. Садырин, С.П. Киселёв, И.Ф. Головнёв. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.

4. Свирский О.В., Власова М.А., Клопов Б.А. и др. Аналитический метод расчёта проникания струй кумулятивных зарядов // Тр. Междунар. семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии». Новосибирск, 11-15 авг. 2003 г. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. 2004. С. 461-472.

5. Бабкин А.В., Ладов С.В., Фёдоров С.В., Маринин В.М. Физические аспекты растяжения и разрушения кумулятивных струй в свободном полёте // Тр. Междунар. семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии». Новосибирск, 11-15 авг. 2003 г. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. 2004. С. 473-490.

6. Смеликов В.Г. Устойчивость ограниченной кумуляции. М.: Студия «Этника», 2016.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ВЕДУЩИХ ПОЯСКОВ ВНУТРИ КАНАЛА СТВОЛА

А.А. Квашнёв, М.С. Хребтова

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kvashnyov.2015@stud.nstu.ru

В данной статье исследуется процесс нагрева ведущих поясков внутри канала ствола. В качестве объекта исследования, выбран 122 мм осколочно-фугасный снаряд с медным и стальным ведущими поясками. Исследование проводится при разных длинах стволов орудий.

This article examines the process of heating the leading belts inside the bore. As an object of research, a 122 mm high-explosive fragmentation projectile with copper and steel leading belts was selected. The study is carried out at different lengths of the barrels of the guns.

Использование современных мощных систем артиллерийских орудий приводит к многократному увеличению скорости снаряда, в связи с большой массой пороховых зарядов. Условия, создаваемые большим рабочим давлением пороховых газов и высокими скоростями скольжения артиллерийских снарядов внутри канала ствола, приводят к тому, что ведущие пояски подвергаются экстремальным условиям использования.

Трение пары “ведущий пояс — канал ствола” при скоростях скольжения от ста до нескольких тысяч метров в секунду представляет собой предельный случай внешнего трения [1]. Контактные температуры, в области трения ведущего пояса и канала ствола, могут достигать температур равных или даже превышающих температуру плавления одного из материалов трущейся пары, что вызвано интенсивным выделением тепла в области контакта. В результате существенных физических воздействий в слоях материала, прилегающих к границе контакта, происходят интенсивные пластические деформации, из-за чего, в участках касания возникают локальные очаги плавления. По мере возрастания скорости движения снаряда внутри канала ствола, очаги превращаются в оплаваемые области более значительных масштабов. И в итоге площадь полного контакта образуется за счет слияния областей плавления.

В 1976 году **Montgomery R.S.** провёл испытания износа материалов ведущего пояса артиллерийского снаряда в условиях высокоскоростного скольжения. [2]. Основным его предположением было то, что износ канала ствола крупнокалиберной пушки напрямую влияет на срок её службы. Монтгомери сделал вывод, что при образовании расплавленной плёнки на поверхности ведущего пояса

скольжение становится смазанным, а трение можно определить гидродинамически. В этом случае износ конкретного ленточного материала определяется количеством тепла, передаваемого ему. Таким образом, из-за того, что частично расплавленный поверхностный слой удаляется, было доказано, что высокая температура плавления необходима, чтобы материал ведущего пояска имел хорошую износостойкость. Помимо этого, Монтгомери составил таблицы зависимости трения от скорости, и типа материала ведущего пояска.

Простейшую математическую модель распределения температуры можно получить с помощью теории температуры вспышки Блока. Температура поверхности T в любой точке, перекрываемой тепловым источником, равна:

$$T = 2Q\left(\frac{t}{\pi k \rho c}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где t – время прохождения теплового источника через рассматриваемую точку; Q – удельная мощность; k – теплопроводность; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость;

Источником тепла является фрикционный контакт «ведущий поясок – канал ствола». Мощность тепловыделения в области контакта:

$$Q = fpV, \quad (2)$$

где p – удельное давление; f – коэффициент трения; V – скорость.

Температура на поверхности контакта описывается выражением:

$$T_{max} = 2\mu P\left(\frac{BV}{\pi k \rho c}\right)^{1/2} \quad (3)$$

Коэффициент трения пары «медь – сталь» на начальный момент времени принимался равным 0,165 [3]. Удельное давление на всем протяжении канала ствола во время выстрела постоянно. Для материала М1 типового ведущего пояска она равна 1053 °С, что соответствует температуре плавления 1083 °С за вычетом температуры окружающей среды, равной 30 °С. Для материала С60 коэффициент трения пары «сталь – сталь» на начальный момент времени принимался равным 0,0846, «температура вспышки» равна 1420 °С, что соответствует температуре плавления 1450 °С за вычетом температуры окружающей среды, равной 30 °С. Средние контактные давления P , зависящие от точности изготовления ведущего пояска. Для меди: в случае изготовления ведущего пояска при максимальных допусках использовалось $P_1 = 1250$ МПа, при минимальных допусках

$P_2 = 1239$ МПа. Аналогично при расчетах температуры на поверхности контакта стального ВП: $P_1 = 641,6$ МПа и $P_2 = 633,6$ МПа соответственно. Для определения скоростей была использована зависимость, экспериментально определенная Е.А. Хмельниковым в своих трудах [4].

По результатам расчетов выведены зависимости (рисунок 1, рисунок 2) распределения температуры $T^{\circ}\text{C}$ от длины канала ствола l , м.

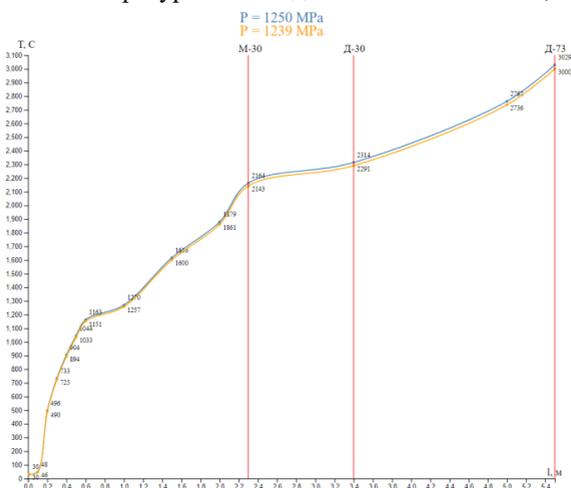


Рисунок 1 – Распределение зависимости температуры от расстояния, пройденного медным ведущим пояском.

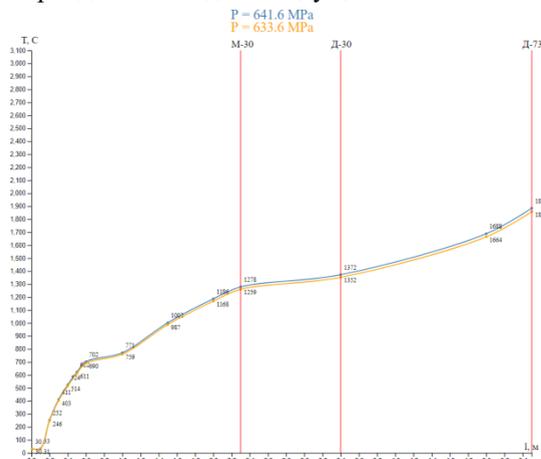


Рисунок 2 – Распределение зависимости температуры от расстояния, пройденного стальным ведущим пояском.

По полученным зависимостям можно сделать следующие выводы:

- рост температуры на поверхностном слое материала ведущего пояска как типового медного, так и нового, изготовленного из материала корпуса можно разделить на три этапа:

- наблюдается резкий рост температуры на расстоянии $l = 0,5$ м для обоих случаев;

- медный ведущий поясок достигает температуры плавления на расстоянии $l = 0,6$ м;

- ведущий поясок, изготовленный из марки стали С60, достигает температуры плавления на расстоянии около $l = 4$ м;

- температура рекристаллизации материала С60, ведущего пояска нового типа достигается при $l = 0,6$ м.

- температура плавления медного ведущего пояска достигается при любых длинах ствола, а для стального только при длине использовании пушки Д-74

Литература:

1. Балакин, В. А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения / В. А. Балакин. – Москва: Машиностроение, 1980. – 136 с.

2. Montgomery, R. S. Surface Melting of Rotating Bands / R. S. Montgomery // *Wear*. – 1976. – Vol. 38. – pp 235 – 243.

3. Guskov A. V. Experimental studies of the physical process for forming the profile of a friction unit in a ballistic installation / A. V. Guskov, M. A. Kormushkin, K. E. Milevskii // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2017. - Vol. 919. - Art. 012011 (7 p.).

4. Хмельников, Е. А. Численный метод расчет прочности корпуса снаряда при выстреле / Е. А. Хмельников и др. // *Вопросы оборонной техники*. – 2013. – сер. 14, вып. 2. – С. 91 – 103. Инв № 13710.

5. Пат. 165294 РФ, F42B 14/02, F42B 10/36. Артиллерийский снаряд к нарезному оружию/Гуськов А.В., Милевский К.Е., Хребтова М.С.; заявитель и патентообладатель Новосиб. гос. тех. ун-т. - №2015153677/03; заявл. 14.12.15; опубл. 10.10.16, Бюл. № 28.

МЕХАНИЗМЫ СИСТЕМЫ ПРЕДОХРАНЕНИЯ ВЗРЫВАТЕЛЕЙ

В.А. Кирюхина, А.А. Нестерова, А.В. Гуськов
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, valeriakiryuxina@gmail.com

В статье рассматривается классификация механизмов системы предохранения взрывателей, с помощью которых обеспечивается безопасность взрывателя. Проводится патентно-информационный обзор. Анализируются преимущества и недостатки рассматриваемых предохранительных механизмов. Выделяется тенденция дальнейшего развития.

The article discusses the classification of mechanisms of the fuse protection system that ensure the safety of the fuse. A patent information review is being conducted. The advantages and disadvantages of the considered safety mechanisms are highlighted. The trend of further development is highlighted.

Взрыватель – это автоматическое устройство, предназначенное для управления действием боеприпаса, то есть для приведения в действие боеприпаса (БП) (снаряда, боевого элемента и др.) в требуемой точке траектории.

Преждевременные срабатывания взрывателей могут происходить в канале ствола орудия и после вылета из орудия [1], что может привести к следующим возможным опасностям: взрыв блока орудий, техники (самолетов, танков и др.), людей, находящихся в непосредственной близости с БП и техникой.

1) При выстреле во время движения БП в канале орудия: самопроизвольное действие капсулей от сотрясения при выстреле; преждевременное или неправильное действие ударных механизмов (слабая контрпредохранительная пружина (КТД)); для донных ВУ – ненадежная обтюрация ВУ в местах соединения его с БП.

2) Непосредственно после вылета БП из канала ствола: неправильное действие узлов и деталей ВУ; самопроизвольное воспламенение капсулей.

3) Во время полета БП на траектории: нутация БП, приводящая к преждевременному действию ВУ; влияние метеоосадков (дождь, снег и т.д.).

Для того, чтобы исключить случаи преждевременного срабатывания взрывателя существует система предохранения (СП) с предохранительными механизмами (ПМ), устройствами и деталями. СП может иметь одну и более ступеней предохранения. Обеспечение безопасности в производстве и в служебном обращении, при выстреле, а

также безотказность действия взрывателя гарантируют мероприятия, связанные с применением: стойких к перегрузкам служебного обращения капсулей и детонаторов и возможно минимальным количеством ВВ в их составе, ПМ, механизмов изоляции капсулей (МИК), отдельным хранением взрывателей и БП, механизмов дальнего взведения (МДВ) и блокирующих механизмов.

Проведем патентный обзор и рассмотрим механизмы СП для обеспечения безопасности взрывателя.

Для предотвращения случаев преждевременного срабатывания БП, безопасность в служебном обращении при случайном срабатывании электродетонатора, при пуске боеприпаса, на траектории до момента взведения, а также повышенную ударную устойчивость к воздействию импульсных механических сил различной природы на траектории полета снаряда после взведения по электрической и огневой цепям и надежность функционирования боеприпаса при встрече с преградой, авторы патента RU 2255302 С1 [2] предложили следующий предохранительно-исполнительный механизм (ПИМ) (рис.1).

При пуске ракеты под действием сил инерции оседает один из стопоров 8 или 9, частично освобождая при этом движок 1, под действием стартового ускорения происходит оседание второго стопора 8 или 9 и полное освобождение движка. При поступлении электрического сигнала на пусковой электровоспламенитель 6 происходит его срабатывание, вызывая срабатывание вышибного заряда 2, продукты взрыва которого перемещают движок 1 в сторону расточки 11. При этом шток микропереключателя 12 освобождается и подключает к боевой цепи ПИМ контактные датчики цели. В результате ударного столкновения фиксатора 3 с кольцевой расточкой 11 корпуса 7 происходит расклепывание деформируемой конусной чашечки фиксатора 5, которая жестко фиксируется в расточке. При этом передаточный заряд 5 становится под электродетонатором 10, а движок надежно зафиксирован во взведенном положении. ПИМ взведен по огневой и электрической цепи и устойчив к воздействию импульсных механических нагрузок на траектории полета ракеты и при встрече с целью. ПИМ срабатывает от сигнала контактных датчиков.

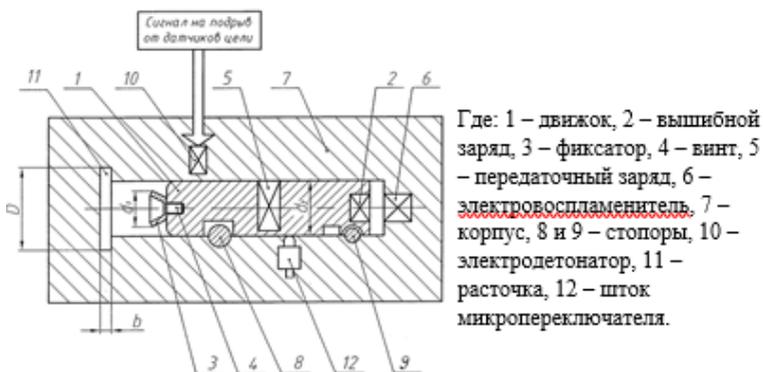
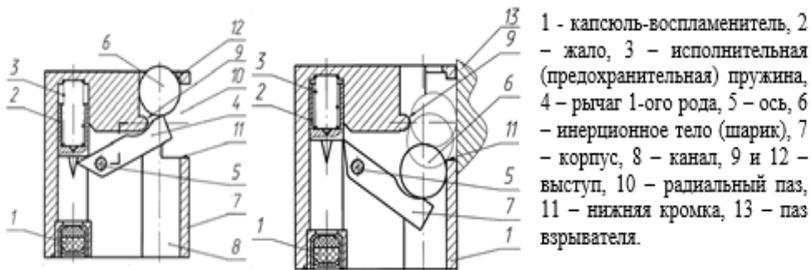


Рис.1. Предохранительно-исполнительный механизм (патент RU 2255302 C1).

Рассмотрим RU 2439483 C2 предохранительно-воспламенительного механизма (ПВМ) взрывателя [3] (рис. 2). Задача, которая решается в данном ПВМ состоит в том, чтобы обеспечить надежность взведения взрывателя в широком диапазоне линейных ускорений (при перегрузке от несколько сот единиц до десятков тысяч) с одновременным выполнением требований эксплуатационной безопасности, в том числе и в случае случайного падения на преграду, торможении в канале ствола или в пусковой направляющей за счет использования естественных отличий характеристик ускорений и устройства, заставляющего инерционное тело (шарик) двигаться по зигзагообразной траектории, что в свою очередь обеспечивают выступы, расположенные на противоположных стенках канала по ходу движения шарика. В этом случае кинетическая энергия, запасенная инерционным телом, гасится на указанных выступах, и если нет длительной подпитки этой энергией (служебное обращение), то взрыватель не взведется. Также эксплуатационная безопасность взрывателя обеспечивается жесткостью пружины накольного механизма, которая посредством рычага удерживает инерционное тело от перемещения.



Рс.2. ПБМ в служебном обращении и в момент спуска жала.

Авторы патента RU 2413176 С1 [4] предложили ПБМ (рис.3), в котором: под воздействием стартовых перегрузок при достижении определенной величины инерционных сил начинает работу блокирующий механизм, в частности центробежные подпружиненные фиксаторы, выходящие из зацепления с перегородкой и сжимают пружины 9 и выходят из зацепления с перегородкой 3, т.е. выходят из пазов перегородки 3, после чего перегородка 3 удерживается силами трения между деталями механизма и линейным фиксатором 10 за счет действия линейной силы, проекция которой на направление, нормальное оси взрывателя, превышает центробежную силу до момента выхода боеприпаса на траекторию полета. Это приводит к затягиванию процесса взведения перегородки 3 и увеличивает время взведения ПБМ, что дает возможность боеприпасу удалиться от места вылета на большее расстояние. Что обеспечивает повышение надежности функционирования и безопасности при обращении путем уменьшения вероятности несанкционированного срабатывания взрывателя.



Рис.3. ПБМ (RU 2413176 С1).

Вывод: рассмотрели разные виды ПМ в зависимости от заданных условий выстрела, определены их достоинства и рассмотрены механизмы, в которых обеспечиваются безопасность в эксплуатации и надежность функционирования.

Литература:

1. Наука и образование (электронный научно-технический журнал): Особенности конструкций взрывательных устройств для боеприпасов ствольной артиллерии. /Козлов В.И.: - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012 г., 76 с.
2. Патент 2255302 РФ. Предохранительно-исполнительный механизм взрывателя/Егоренков Л.С., Сулин Г.А., Платонов Н.А., Брагин В.А., Оськин И.А., Свищевский Ю.И.. Оpubл. 27.06.2005 Бюл. № 18.
3. Патент 2439483 РФ. Предохранительно-воспламенительный механизм взрывателя/Буров В.С., Некрасов В.В., Киселев В.А.. Оpubл. 10.01.2012 Бюл. № 1.
4. Патент 2413176 РФ. Предохранительно-воспламенительный механизм взрывателя/Поляков Ю.М., Шаврин А.Г., Удовиченко В.Н., Шанина Л.В.. Оpubл. 27.02.2011 Бюл. №

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ. ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ.

Ю. В. Немировский^{1, 2}, В.Л. Литвинов¹
Новосибирский государственный технический университет¹,
Институт теоретической и прикладной механики им. С. А.
Христиановича, СО РАН ².
г. Новосибирск.
v.litvinov.2017@stud.nstu.ru

В статье рассмотрена задача о трехточечном изгибе биметаллической балки при кубическом законе деформирования. Описан возможный способ оптимизации конструкции и управления напряжениями и перемещениями балки.

The article deals with the problem of three-point bending of a bimetallic beam with a cubic law of deformation. A possible way to optimize the design and control the stresses and displacements of the beam is described.

Рассмотрим шарнирно опертую балку длины \bar{l} , нагруженную сосредоточенной силой \bar{P} в пролете и регулирующими изгибающими моментами в опорных сечениях M_1^* и M_2^* (рис. 1).

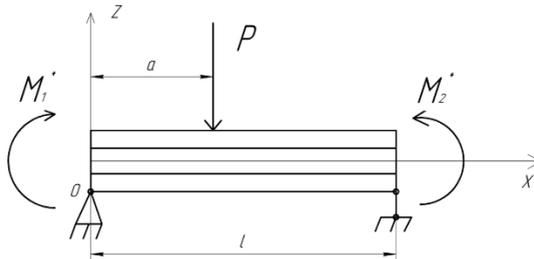


Рис. 1 – Внешние силы

Для простоты ограничимся случаем балок с постоянным поперечным сечением с двухсимметричным расположением в сечении фазовых материалов (рис. 2). Для полиметаллических конструкций, составленных из набора любых пар металлических конструкционных материалов характерно свойство равносопротивляемости при растяжении и сжатии, практически на всем диапазоне деформирования. Диаграмма деформирования с достаточной точностью может быть аппроксимирована зависимостью

$$\bar{\sigma} = \bar{A}\varepsilon + \bar{B}\varepsilon^3 \quad (1)$$

где \bar{A} – модуль упругости и \bar{B} – характеристика, связанная с секущим модулем для деформации ε^* предразрушения при напряжении равном пределу прочности $\bar{\sigma}^*$ данного материала.

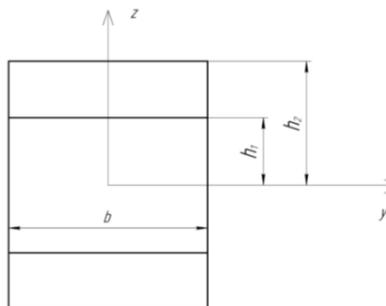


Рис. 2 – Поперечное сечение балки.

Материалы, подчиняющиеся зависимости (1) обладают тремя характерными предельно допустимыми уровнями деформирования: ε_0 –

предельно упругая деформация, ε^* - деформация предразрушения, ε^{**} - деформация разрушения [1,2], где

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma^0}{A}, \varepsilon^* = \frac{3\sigma^*}{2A}, \varepsilon^{**} = \sqrt{3}\varepsilon^* \quad (2)$$

σ^0 – предел упругости материала.

В качестве эталонного образца для сравнительной оценки всех интересующих нас величин будем использовать стержень прямоугольного сечения с характеристиками $\sigma_0^0, A_0, h_0, b_0, \rho_0, F_0$ и безразмерные характеристики

$$x = \frac{\bar{x}}{l}, z = \frac{\bar{z}}{h_0}, h_i = \frac{\bar{h}_i}{h_0}, \sigma_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{\sigma_0^0}, \rho_i = \frac{\bar{\rho}_i}{\rho_0}, b_i = \frac{\bar{b}_i}{b_0}, F_i = \frac{\bar{F}_i}{F_0} \quad (3)$$

где $\bar{\rho}_i$ – плотность материала, $2b_i$ – ширина сечения, \bar{F}_i – площадь сечения i -го слоя.

В качестве критерия сравнения проектов примем требование равенства весов биметаллической и эталонной конструкции, которая примет вид

$$h_1 b_1 \rho_1 + (h_2 - h_1) b_2 \rho_1 = 1 \quad (4)$$

При изгибе рассматриваемых стержней, в соответствии с гипотезами Кирхгофа – Лява, связь деформации с безразмерной кривизной и прогибом имеет вид

$$\varepsilon(x, z) = \kappa(x)z, \quad \kappa(x) = -\frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} \quad (5)$$

а напряжения в слоях биметаллического стержня будут равны

$$\begin{aligned} \sigma_1(x, z) &= A_1 \kappa(x)z + B_1 (\kappa(x)z)^3 \\ \sigma_2(x, z) &= A_2 \kappa(x)z + B_2 (\kappa(x)z)^3 \end{aligned} \quad (6)$$

Эти напряжения создают в сечениях x изгибающий момент

$$\begin{aligned} -M(x) &= 4 \int_0^{h_1} (A_1 \kappa(x)z + B_1 (\kappa(x)z)^3) b z dz + 4 \int_{h_1}^{h_2} (A_2 \kappa(x)z + \\ & B_2 (\kappa(x)z)^3) b z dz = I_1 \kappa(x) + I_2 \kappa^3(x) \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{4}{3} (A_1 h_1^3 + A_2 (h_2^3 - h_1^3)) \\ I_2 &= \frac{4}{5} (B_1 h_1^5 + B_2 (h_2^5 - h_1^5)) \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда уравнение, связывающее кривизну и изгибающий момент будет следующим

$$I_2 \kappa^3(x) + I_1 \kappa(x) + M(x) = 0 \quad (9)$$

Действительный корень данного уравнения имеет вид [3]

$$\kappa(x) = \sqrt[3]{\frac{-I_1}{3I_2} [\cos(\varphi(x)) - \sqrt{3} \sin(\varphi(x))]} \quad (10)$$

$$\text{где } \varphi(x) = \frac{1}{3} \left[\pi - \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{-4}{27} \frac{I_1^3}{I_2 M^2(x)} - 1} \right) \right] \quad (11)$$

Распределение моментов и перерезывающих сил вдоль пролета балки определяется формулами

На участке $x \in (0; a)$:

$$Q(x) = P(1 - a) - M_1^* + M_2^*$$

$$M(x) = M_1^*(P(1 - a) - M_1^* + M_2^*)x \quad (12)$$

На участке $x \in (a; 1)$:

$$Q(x) = -Pa - M_1^* + M_2^*$$

$$M(x) = M_2^* + (Pa + M_1^* - M_2^*)(x - l) \quad (13)$$

Формулы (2), (4)-(6) совместно с выражениями (8)-(13) устанавливают связи между параметрами отбора и распределения материалов в создаваемой конструкции, управлениями нагружения и закономерностями наиболее благоприятных условий деформирования в требуемых границах, задаваемых эксплуатационными режимами.

Приведем решение частной задач.

На рис. 4 приведены графики зависимости прогиба вдоль пролета балки при

$$a = 0.5, P = 6.25, I_1 = 200, I_2 = -1.2 * 10^5$$

Большой прогиб соответствует схеме нагружения без регулирующих моментов, меньший – при нагружении оптимальными регулируемыми моментами.

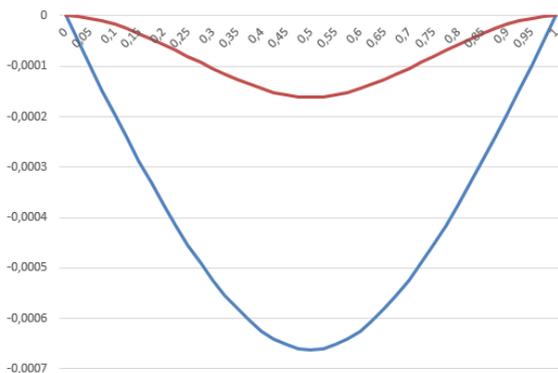


Рис. 3 – Безразмерные прогибы балки.

Регулирующие моменты удовлетворяют условию равнопрочности: максимальный по модулю момент находится в трех сечениях (в данном случае $x = 0, x = 0.5, x = 1$). Как видно из рисунка, при воздействии оптимальных регулирующих моментов прогиб балки резко уменьшается.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-01-00038.

Литература:

1. Немировский Ю.В., Второе предельное состояние однородных балок / Вестник Чувашиского педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2009. – №1, с. 150-159
2. Немировский Ю.В., Эквивалентные по предельному состоянию однородные и композитные балки / Вестник Чувашиского педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2014. – №2(20), с. 78-84
3. Немировский Ю.В., О предельно допустимых деформациях полиметаллических стержней при изгибе сосредоточенными нагрузками / Вестник Чувашиского педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2020. – №1(43), с. 11-21

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА МАХА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ

М.А. Морозов, А.С. Калашников, К.Е. Милевский

**¹Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, m.morozov.2017@stud.nstu.ru**

**²Институт теоретической и прикладной механики им. С. А.
Христиановича**

Статья посвящена описанию методики определения числа Маха в аэродинамической трубе «периодического» действия баллонного типа. В описании рассмотрены схема и принцип действия аэродинамической трубы и экспериментальный метод определения числа Маха в рабочей части аэродинамической трубы.

The article is devoted to the description of the method of determining the Mach number in the wind tunnel of "periodic" action of the cylinder type. In the description the scheme and principle of operation of the wind tunnel and the experimental method of determining the Mach number in the working part of the wind tunnel are considered.

Схема и принцип работы аэродинамической трубы периодического действия баллонного типа

Аэродинамическая труба – это установка, в которой создается воздушный поток с заданными параметрами, позволяющий проводить эксперименты, которые представляют интерес для инженеров-

аэродинамиком. Аэродинамическая труба «периодического» действия баллонного типа с выхлопом в атмосферу, представленная на рисунке 1 [1].

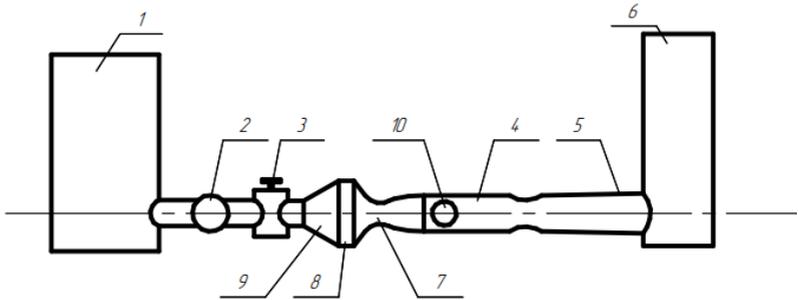


Рис. 1 - схема аэродинамической трубы периодического действия баллонного типа с выхлопом в атмосферу: 1 – резервуар с воздухом; 2 – запорный кран; 3 – регулятор давления; 4 – рабочая часть; 5 - диффузор; 6 – глушитель шума; 7 - сопло; 8 - ресивер; 9 – диффузор с большим углом расширения; 10 – окно.

Принципиальная работа рассматриваемой аэродинамической трубы выглядит следующим образом: открывается запорный кран и регулятором давления устанавливается и поддерживается постоянное давление торможения в аэродинамической трубе, поток, проходя через диффузор с большим углом расширения (45° - 90°), замедляется, а давление в потоке соответственно растет. В ресивере (форкамере) установлены сетчатые экраны, спрямляющие поток и снижающие его уровень турбулентности, откуда воздух попадает в дозвуковую часть сопла. В дозвуковой части, площадь поперечного сечения сопла уменьшается, что способствует постепенному увеличению скорости потока. Проходя через наименьшее (критическое) сечение сопла, число Маха в потоке достигает единицы, далее, с увеличением площади поперечного сечения сопла, число Маха растет до того момента, пока поток не перейдет в рабочую часть.

Определение числа Маха

Для снятия параметров сверхзвукового потока, вне аэродинамической трубы устанавливаются аналоговые датчики абсолютного давления, которые соединяются дренажными трубками с отверстиями, расположенными в ресивере и за рабочей частью трубы. Для более точного измерения длину дренажной трубки выбирают минимальной, так как в длинной трубке давление будет выравниваться дольше. В

качестве устройства, регистрирующего показания с датчиков используется аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), при помощи которого, аналоговые показания с датчиков преобразуются в дискретный код, который впоследствии обрабатывается приложением LGraph. Давление получаемое с датчика, соединенного с ресивером обозначается, как P_n , а давление за рабочей частью, как $P_{ст}$ (статическое давление).

На рисунке 2 представлены зависимости снимаемых показаний давления от времени, при установленном сопле с заданным числом Маха $M = 2$.

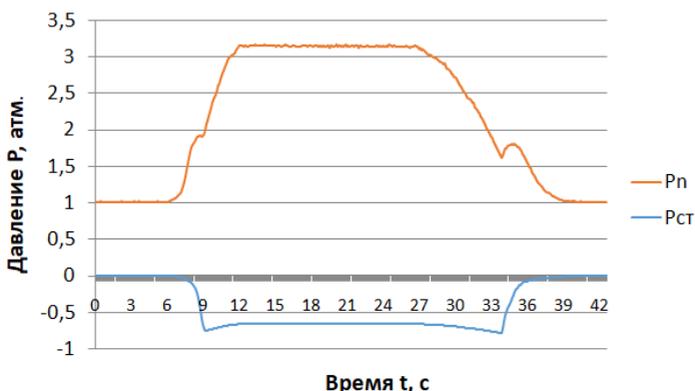


Рис. 2 – зависимость давления от времени

Для наглядности, зависимость $P_{ст}$ смещена вдоль оси ординат на 1 атм. Как видно из полученной зависимости, время, необходимое для того, чтобы в рабочей части установился стационарный процесс, составило приблизительно 5 секунд. Исходя из полученных данных, число Маха определяется по формуле Бернулли (1):

$$\frac{P_n}{P_{ст}} = \left(1 + \frac{k - 1}{2} * M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (1)$$

- где M – число Маха;
- k – показатель адиабаты;
- P_n - давление в ресивере;
- $P_{ст}$ - статическое давление.

На рисунке 3 представлена зависимость числа Маха в рабочей части во времени, от начала и до окончания проведения эксперимента.

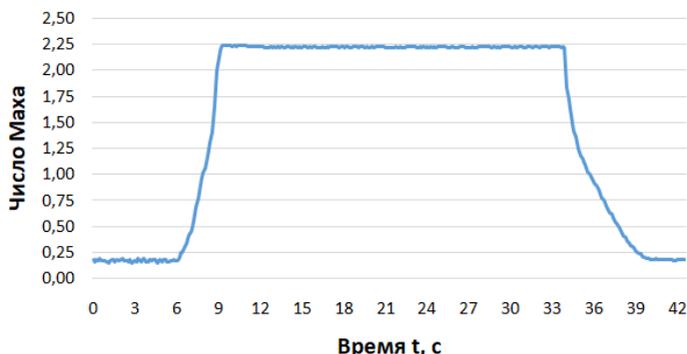


Рис. 3 – число Маха воздушного потока в рабочей части

Поскольку полученное число Маха расходится с заданным, имеет смысл провести замеры геометрических характеристик сопла, установленного в аэродинамическую трубу, чтобы подтвердить заданное критическое сечение. Число Маха, при известных геометрических характеристиках, определяется по формуле (2) [2].

$$\frac{F}{F_{кр}} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{1 + \left[\frac{k-1}{2} \right] M^2}{\left[\frac{k+1}{2} \right]} \right\}^{2 \frac{k+1}{k-1}}, \quad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения рабочей части, мм;

$F_{кр}$ – критическая площадь поперечного сечения сопла, мм;

M – число Маха;

k – показатель адиабаты.

Для воздуха $k = 1,4$, тогда формула (1) принимает вид:

$$\frac{F}{F_{кр}} = \frac{(1 + 0,2M^2)^3}{1,73M}. \quad (3)$$

Площадь поперечного сечения рабочей части $F = 4 * 10^4$ мм, критическое сечение сопла $F_{кр} = 23,7 * 10^3$ мм.

Решив уравнение (3) при помощи системы Mathcad, получим число Маха: $M = 2$. Следовательно, геометрические характеристики сопла не нарушены.

Выводы

Необходимые параметры сверхзвукового потока не могут полностью гарантироваться геометрической характеристикой сопла, поскольку на проведение эксперимента в значительной степени могут влиять макропараметры окружающей среды. При проведении эксперимента в аэродинамической трубе, всегда необходимо учитывать при каких условиях он будет проводиться, и в соответствии с этим, делать необходимые поправки при обработке полученных данных.

Литература:

1. А. Роу, К. Гоин. Аэродинамические трубы больших скоростей, перевод с англ. под ред. Н.Н. Широкова. – Москва: Изд-во “Мир”, 1968 – 503 с.
2. Г.Н. Абрамович. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учеб. руководство: Для вузов. - 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит, 1991. – 600 с. – ISBN 5-02-014014-5.

СИСТЕМЫ САМОЛИКВИДАЦИИ УСТРОЙСТВ

А.И. Цыбрий, С.С. Назаров, К.Е. Милевский
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, nazarov.s.2000@mail.ru

Проведен патентный обзор систем самоликвидации разнообразных устройств. Рассмотрены основные методы самоликвидации. Установлены перспективные направления развития устройств самоликвидации.

A patent review of self-liquidation systems for various devices is carried out. The main methods of self-liquidation are considered. The promising directions for the development of self-destruction devices have been established.

На сегодняшний день существуют множество вариантов устройств самоликвидации различного уровня сложности. Рассмотрим некоторые из них и выявим перспективные направления развития устройств самоликвидации.

Патент RU 2111447 С1 (См. Рис.1). Устройство, предназначенное для ликвидации ракет 1 на расчетном времени в условиях ограниченных по дальности полигонов. Устройство содержит разрывную капсулу с зарядом 3, установленную в полости твердотопливного заряда двигателя 2. Полость образована со стороны переднего торца твердотопливного заряда и имеет бронировку в виде вклеенного в ее донную часть стакана из теплозащитного материала. В разрывной капсуле со стороны

открытого торца стакана выполнены радиальные газоходные отверстия, соединяющие ее полость с полостью твердотопливного заряда двигателя [1].

Самоликвидация твердотопливного двигателя происходит следующим образом. Перед запуском ракеты на полигоне задается необходимое время с учетом температур от $+50^{\circ}\text{C}$ до -50°C , изготавливается твердотопливный заряд с полостью, в которую устанавливается разрывная капсула и бронирующий стакан необходимой длины. После выхода ракеты на заданную высоту происходит разрыв капсулы по месту стыка и происходит резкий скачек давления в камере двигателя и его разрушение, т.е. самоликвидация двигателя. В результате разрушения двигателя происходит ухудшение аэродинамических характеристик ракеты, резко падают скорость и дальность ее полета.

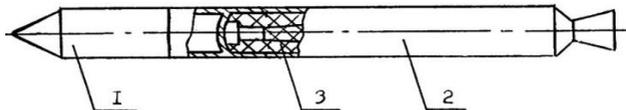


Рис.1—Устройство самоликвидации ракеты с твердотопливным двигателем RU 2111447 C1

Патент RU 2316722 C1 (См. Рис.2). Устройство для самоликвидации ракеты, содержащее первый источник питания, первый электродетонатор и первый датчик, отличающееся тем, что оно снабжено блоком управления, устройством коммутации состояния, вторым датчиком, вторым источником питания, вторым электродетонатором, шиной управления и входной шиной, при этом первый и второй датчики выполнены с возможностью срабатывания на заданном участке траектории, входы первого и второго датчиков соединены соответственно с первым выходом устройства коммутации состояния и выходом первого источника питания, а выходы соответственно - с входом первого электродетонатора и первым входом устройства коммутации состояния, управляющий вход которого соединен с шиной управления, второй выход - с входом второго электродетонатора, а второй вход - с выходом блока управления, управляющий вход которого соединен с входной шиной, а вход - с выходом второго источника питания [2]. Технический результат, заключающийся в обеспечении возможности самоликвидации ракеты при нештатном пуске, достигается тем, что в устройство для самоликвидации ракеты, содержащее два источника питания, первый электродетонатор и первый датчик, введены блок управления, устройство коммутации

состояния, второй датчик, второй электродетонатор, шина управления и входная шина, первый и второй датчики выполнены в виде траекторных датчиков, входы которых соединены соответственно с первым выходом устройства коммутации состояния и выходом первого источника питания, а выходы соответственно со входом первого электродетонатора и первым входом устройства коммутации состояния, управляющий вход которого соединен с шиной управления, второй выход - со входом второго электродетонатора, а второй вход - с выходом блока управления, управляющий вход которого соединен со входной шиной, а вход - с выходом второго источника питания.



Рис.2–Устройство для самоликвидации ракеты RU 2316722_C1.

Патент RU 2343399 C1 (См. Рис.3). Это устройство для самоликвидации ракеты, содержащее источник питания, электродетонатор и первый датчик, отличающееся тем, что оно снабжено входной шиной, шиной управления, блоком управления, последовательно соединенными вторым и третьим датчиками, устройством коммутации состояния, управляющий вход которого соединен с шиной управления, а первый вход - с выходом блока управления, управляющий вход которого соединен с входной шиной, а вход - с выходом источника питания и входом третьего датчика, выход второго датчика соединен со вторым входом устройства коммутации состояния, первый выход которого соединен с входом первого датчика, выход которого соединен с входом электродетонатора и со вторым выходом устройства коммутации состояния, при этом первый, второй и третий датчики выполнены в виде траекторных датчиков [3].

Устройство для самоликвидации ракеты работает следующим образом. Перед штатным пуском ракеты производится подача

напряжения питания на устройство коммутации состояния и блок управления. Далее устройство коммутации состояния переводится при помощи специального (кодowego) сигнала с шины управления в состояние, обеспечивающее прохождение сигнала с блока управления на электродетонатор и исключающее прохождение сигнала через траекторные датчики.

После осуществления штатного пуска ракеты при необходимости (например, при отклонении ракеты от заданной траектории) с земли подается сигнал на самоликвидацию ракеты. При этом источник питания подключается через блок управления и устройство коммутации состояния к входу электродетонатора устройства ликвидации, что вызывает его срабатывание и самоликвидацию ракеты. В исходном состоянии устройства для самоликвидации ракеты исключена возможность самоликвидации ракеты перед ее пуском путем случайной выдачи команды через входную шину на блок управления, так как выход блока управления отключен от входа электродетонатора устройством коммутации состояния. Траекторные датчики, соединенные с входом траекторного датчика (в исходном состоянии его вход замкнут с выходом нормально замкнутым контактом) через устройство коммутации состояния, обеспечивают подачу напряжение с источника питания на электродетонатор в случае нештатного (например, аварийного или случайного) пуска ракеты. При выходе ракеты на траекторию полета на первом заданном участке траектории срабатывают траекторные датчики, что приводит к подключению источника питания к входу электродетонатора устройства ликвидации, который срабатывает и вызывает самоликвидацию ракеты.



Рис.3–Устройство для самоликвидации ракеты RU 2343399_C1.

Рассмотрев данные технические решения, можно сделать выводы, что ни один из них не имеет применения в широком спектре

технических объектов. Так же в рассмотренных системах отсутствует возможность фиксации (сигнализации) времени и места срабатывания устройства самоликвидации. В научно – технической литературе [1-4] не обнаружено описания устройств самоликвидации с сигнализацией срабатывания. Таким образом, предложенное направление развития системы самоликвидации удовлетворяет критерию "новизна".

Литература:

1. Патент 2111447, МКП F 42В 15/10 Российская Федерация. Устройство самоликвидации ракеты с твердотопливным двигателем / В.Д.Смирнов, Ю.Ю.Махонин, Б.И.Фещенко, Л.Д.Власов. – № 95104691/02; заявл. 31.03.1995; опубл. 20.05.1998, с.: ил.
2. Патент 2316722, МКП F 42С 9/00 Российская Федерация. Устройство для самоликвидации ракеты/ А.А.Косарев, О.А.Островский, Г.И.Шишкин. – № 2006124921/02; заявл. 11.07.2006; опубл. 10.02.2008, Бюл. № 4с.: ил.
3. Патент 2343399, МКП F 42С 9/00 Российская Федерация. Устройство для самоликвидации ракеты/ А.А.Косарев, О.А.Островский, Г.И.Шишкин. – № 2007117983/02; заявл. 14.05.2007; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1с.: ил.
4. Средства поражения и боеприпасы: Учебник / А. В. Бабкин, В. А. Велданов, Е. Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред. В. В. Селиванова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 984 с.: ил.

НАПРАВЛЕННЫЕ ОСКОЛОЧНЫЕ ПОТОКИ

Нестерова А.А., Кирюхина В.А., Гуськов А.В.
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, nesterova.2017@stud.nstu.ru

В статье рассматривается классификация осколочных боеприпасов по способу направления осколочных потоков. Проводится патентно-информационный обзор. Выделяются преимущества и недостатки рассматриваемых осколочных полей. Выделяется тенденция дальнейшего развития.

The article discusses the classification of fragmentation ammunition according to the method of direction of fragmentation flows. A patent information review is underway. The advantages and disadvantages of the considered fragmentation fields are highlighted. The trend of further development is highlighted.

Осколочные боеприпасы на данный момент являются основным элементом арсенала любой современной армии. Поражение живой силы – это из основных факторов успеха на поле боя, достичь которого невозможно без применения снарядов, мин и гранат осколочного действия.

Осколочные боеприпасы (ОБП) классифицируют на два вида осколочного поля:

- ОБП с круговыми полями;
- ОБП с осевыми полями;

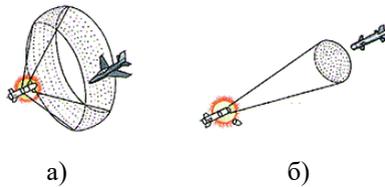


Рис. 1 - конфигурации осколочного поля ОБП
а) ОБП с круговым полем, б) ОБП с осевым полем

ОБП с круговыми полями являются наиболее распространенными. Их главными преимуществами являются наиболее высокий коэффициент использования энергии взрывчатого вещества (ВВ), возможность расположения боевой части в любом месте снаряда и поражения цели при произвольной стороне промаха. Основным недостатком таких ОБП является низкая плотность осколочного поля.

Недостатки круговых полей проявляются при стрельбе по наземным целям с ударным разрывом при углах падения, меньших 90° .

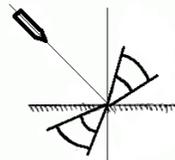


Рис. 2 – образование поражаемых секторов на поверхности при падении снаряда под углом меньше 90°

Основное количество осколков разлетается в плоскости, перпендикулярной оси снаряда. Большая часть осколков уходит в воздушное пространство и грунт, и только небольшая часть осколков, стелющихся вдоль поверхности земли, используется для поражения целей. Вследствие этого возникает задача как наиболее эффективно распределить плотность кругового осколочного поля. Было предложено с помощью доворота оси ОБП. Основным видом доворота для круговых

ОБП наземного действия является доворот оси осколочного боеприпаса перед подрывом до вертикального положения с целью создания на местности кругового поля поражения.

Авторами патента [5] предложена конструкция, где на пассивном участке включается газогенератор, тем самым газы, ударяясь о лопасти крыльчатки, замедляют вращательное движение снаряда, выставляя снаряд вертикально. На высоте 10-15 м срабатывает предконтактный взрыватель в тот момент, когда снаряд находится в вертикальном положении без нутационного-прецессионного движения, в следствии чего снаряд принимает вертикальное положение для создания на местности кругового поля поражения.

Тенденция дальнейшего развития заключается в переходе к осевым полям, позволяющим достичь высокой концентрации энергии в осколочном потоке. Основными преимуществами боеприпасов с осевым полем является прямое суммирование скоростей снаряда и метаемых готовых поражающих элементов.

Недостатками осевой схемы являются низкий коэффициент использования энергии взрывчатого вещества (основная масса продуктов детонации разлетается в радиальном направлении) и необходимость расположения боевой части в головной части снаряда или сброса перед подрывом отсека, находящегося впереди боевой части.

По способу сообщения готовым поражающим элементам дополнительной скорости относительно корпуса снаряда могут быть выделены четыре подкласса:

- Кинетический пучковый
- Пороховая шрапнель (скорость придания дополнительной скорости ГПЭ- пороховой заряд)
- Осколочно-пучковый (скорость придания дополнительной скорости готовых поражающих элементов (ГПЭ) - Заряд ВВ)
- Комбинированный

На рис.3 представлена предложенная авторами патента [6] схема осколочно-пучкового снаряда с передним расположением осколочного блока.

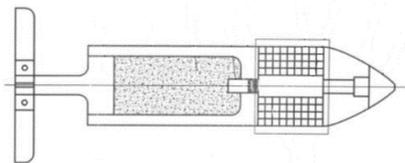


Рис.3 - схема снаряда с передним расположением осколочного блока

Способ повышения эффективности действия осколочно-пучкового снаряда заключается в том, что корпус осколочного блока выполнен в виде многослойного кольцевого набора, по оси которого устанавливают удлиненный заряд взрывчатого вещества, увеличивают количество поражающих элементов путем предварительной подготовки корпуса осколочного блока посредством нанесения продольных и поперечных рифлений, кольцевые слои осколочного блока выполняют в виде цилиндрических спиралей. Использование предложенного технического решения позволит создать осколочно-пучковый снаряд с осколочным блоком, установленным снаружи корпуса снаряда, разрушающимся при взрыве с образованием осколков заданного дробления.

Основным преимуществом осколочно-пучковых снарядов является сохранение в составе снаряда заряда взрывчатого вещества, обеспечивающего многофункциональное действие снаряда

Недостатки осколочно-пучковых снарядов:

- уже упомянутые низкий КПД использования энергии заряда взрывчатого вещества вследствие малой площади контакта заряд-блок готовых поражающих элементов (и как следствие невысокая скорость метания многослойного блока ГПЭ) и необходимость отстрела отсека, расположенного впереди боевой части;

- большой угол разлета готовых поражающих элементов;
- неравномерное распределение готовых поражающих элементов по сечению потока;

- значительное эшелонирование готовых поражающих элементов в потоке;

- сравнительно высокая стоимость изготовления блока готовых поражающих элементов, в особенности, при использовании тяжелых сплавов на основе вольфрама или урана, отсутствие серийных станков для плотной укладки готовых поражающих элементов, имеющих, например, цилиндрическую форму.

По условиям боевого применения желательно, чтобы один и тот же снаряд в одних условиях применения мог создавать круговое осколочное действие. Например, при стрельбе снарядом на мгновенное ударное действие по грунту осколочное поле должно быть круговым, а при стрельбе с дистанционным взрывателем - осевым. Таким является ОБП с объемным полем поражения. На рис. 4 представлена схема ОБП с управляемыми осколочными полями и показано совместное действие кругового и осевого полей.

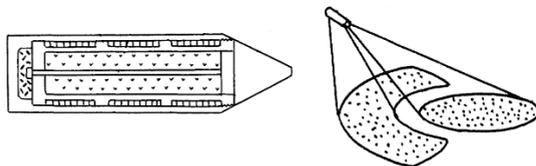


Рис. 4 – схема ОБП с управляемыми осколочными полями и показано совместное действие кругового и осевого полей

Автор патента [7] предложили придать снаряду возможность реализации в зависимости от условий применения или осевого поля, или кругового поля, или того и другого одновременно. Это достигается тем, что в состав подвижного тела вводится разрывной блок в виде корпуса с зарядом ВВ и детонатором, располагаемым по оси снаряда, ГПЭ располагаются между внешней поверхностью разрывного блока и внутренней поверхности снаряда, при этой системе управления позволяет осуществить подрыв разрывного блока как после выброса блока из корпуса снаряда, так и при его нахождении внутри корпуса.

Вывод: рассмотрели классификацию ОБП по способу распределения осколков в пространстве, определили направления исследований по данной теме, а также выделили актуальность проблемы об эффективном поражении осколками точечной цели.

Литература:

1. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. Средства поражения и боеприпасы: Учебник — М.: МГТУ, 2008. — 984 с. ISBN 978-5-7038-3171-7
2. Осколочное действие боеприпасов: учебное пособие / С.С. Рассоха, В.В. Селиванов - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. - 209 с. - ISBN 978-5-7038-4943-9
3. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2004. – 408 с. – (Серия «Учебники НГТУ»). ISBN 5-7782-04671
4. Одинцов В.А. Перспективы развития осколочных боеприпасов осевого действия. Боеприпасы, 1994, № 3-4.
5. Патент 179154 РФ. Осколочно-фугасный снаряд/ Гуськов А.В., Милевский К.Е., Шарков А.В., Ткачев А.А. Оpubл. 28.04.2018, Бюл. № 13.

6. Патент 2559379 РФ. Способ повышения эффективности действия осколочно-пучкового снаряда/ Черниченко В.В., Шепеленко В.Б. Опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.

7. Патент 2148244 РФ. Снаряд с готовыми поражающими элементами/ Одинцов В.А. Опубл. 27.04.2000, Бюл. № 12.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КУМУЛЯТИВНЫЕ БОЕПРИПАСЫ ТАНДЕМНОЙ СХЕМЫ

Шарков А.В., Балаганский И.А.

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

В работе рассмотрены схемы тандемных кумулятивных боеприпасов, с помощью которых могут быть поражены танки, оснащенные динамической защитой.

The paper considers the schemes of tandem anti-tank ammunition, with the help of which tanks equipped with reactive armor can be damaged.

Введение

Разработка тандемных кумулятивных боеприпасов была связана с недостаточной пробиваемостью обычных кумулятивных боеприпасов, так как на танке имелась динамическая защита, которая брала большую часть урона на себя, в результате чего танковая броня в большинстве случаев оставалась целой. В данной статье проводится обзор таких решений на основе имеющихся патентов.

В описании к патенту [1] описана боевая часть к противотанковой ракете. Противотанковая управляемая ракета, содержащая последовательно расположенные блок рулевого привода, ракетный двигатель с сопловым блоком и центральной трубкой, дополнительный кумулятивный заряд и основную кумулятивную боевую часть, отличающаяся тем, что, с целью снижения воздействия элементов динамической защиты на основную кумулятивную боевую часть, в ней канал центральной трубки выполнен ступенчатым, в большей степени которого заподлицо с передней крышкой ракетного двигателя установлен дополнительный кумулятивный заряд. На рис.1 показан общий вид противотанковой управляемой ракеты в разрезе.

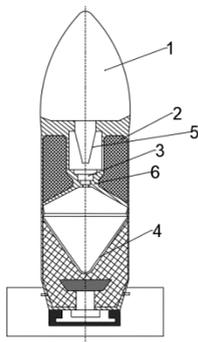


Рис 1. Противотанковая управляемая ракета в разрезе:

- 1- блок рулевого привода, 2- ракетный двигатель, 3- центральная трубка ракетного двигателя, 4- основная кумулятивная боевая часть, 5- дополнительный кумулятивный заряд, 6- ступенчатая внутренняя поверхность центральной трубки.

2-

В описании к патенту [2] описана неуправляемая авиационная ракета с тандемным кумулятивным зарядом, содержащая обтекатель с пьезогенератором взрывателя, корпус, кумулятивную воронку, линзу, кумулятивный заряд взрывчатого вещества, проводник, шайбу, втулку, донную часть взрывателя, пружину и пороховой ракетный двигатель с узлом стабилизации, отличающаяся тем, что она снабжена дополнительным кумулятивным зарядом взрывчатого вещества со стаканом, расположенным между кумулятивным зарядом взрывчатого вещества и ракетным двигателем, при этом стакан выполнен в виде полого контейнера цилиндрической формы, один торец которого соединен с донной частью кумулятивного заряда, а другой - с дополнительным кумулятивным зарядом.

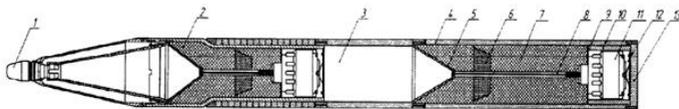


Рис 2. Боевая часть неуправляемой ракеты с тандемным кумулятивным зарядом:

- 1-Пьезогенератор взрывателя, 2- кумулятивный заряд (предзаряд взрывчатого вещества); 3- стакан; 4- корпус; 5- кумулятивная воронка; 6- линза; 7- кумулятивный заряд (дополнительный заряд взрывчатого вещества); 8- проводник; 9- шайба; 10- втулка; 11- донная часть взрывателя; 12- пружина; 13- дно

В описании к патенту [3] описан кумулятивный боеприпас, состоящий из корпуса, в котором размещен заряд взрывчатого вещества с кумулятивной облицовкой, взрыватель, состоящий из пьезогенератора с предохранительно-исполнительным механизмом, отличающийся тем, что между кумулятивной облицовкой и предохранительно-исполнительным механизмом размещена трубка, изготовленная из материала, имеющего скорость звука, превышающую скорость детонации заряда взрывчатого вещества; также кумулятивный боеприпас по п.1, отличающийся тем, что трубка изготовлена двухслойной, при этом внутренний слой выполнен из материала с высокой температурой плавления и испарения.

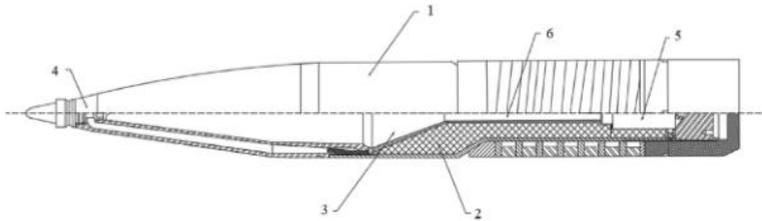


Рис 3. Общий вид и разрез предлагаемого кумулятивного боеприпаса:

- 1 - корпус; 2 - заряд взрывчатого вещества; 3 - медная кумулятивная облицовка; 4 - пьезогенератор взрывательного устройства; 5 - предохранительно-исполнительный механизм взрывательного устройства; 6 - трубка из материала со скоростью звука, превышающей скорость детонации заряда ВВ.

Вывод

Проанализировав боевые части тандемных кумулятивных боеприпасов, можно сделать вывод о том, что данное направление боеприпасов нужно в дальнейшем развивать, так как в динамической защите танков и самой броне танков с каждым годом что-то модернизируется, следовательно поразить танк уже будет тяжелее, из-за того, что степень защищенности танка увеличивается тем или иным образом, а боеприпасы, способные пробить данную броню, стоят на месте, в связи с этим данный вид боеприпасов нужно модернизировать.

Литература:

- 1. Патент SU 1840472 A1 Российская Федерация F42B 15/00 / F42B 12/18. Противотанковая управляемая ракета / Шипунов А.Г., Тихонов В.П., Захаров Л.Г., Ермолаев А.М., Иванов А.Г., Михайлин С.В., Масленников Ю.А., Коротожкин А.И., Филимонов Г.Д.; заявитель и патентообладатель: 300001, г. Тула, Щегловская засека,

Государственное унитарное предприятие « Конструкторское бюро приборостроения», заявл 26.12.2002, опубл. 10.06.2004

2. Патент RU2371667C1, Российская Федерация F42 В 15/00. Неуправляемая авиационная ракета с тандемным кумулятивным зарядом / Ашурков А.А., Ступаков Р.Р., Батуев В.А.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище (военный институт), заявл. 04.02.2008, опубл.27.10.2009, Бюл № 30.

3. Патент RU 2726761 C1, Российская Федерация F42В 12/18, F42В 15/00. Кумулятивный боеприпас /Балаганский И.А., Батраев И.С., Пластинин А.В., Ульяницкий В.Ю., Шарков А.В., Штерцер А.А.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», заявл.24.01.2020, опубл. 15.07.2020, Бюл № 20.

**СЕКЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И
ТАБАЧНЫХ СИГАРЕТ СРЕДИ СТУДЕНТОВ УЧЕБНОГО
ЗАВЕДЕНИЯ НГТУ.**

В.К. Архипова, А.М. Федрак, Е.В. Елистратова.

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, a.viktoriya87@gmail.com**

В данной работе проведено исследование потребления табачных и электронных сигарет среди студентов НГТУ и отмечен ряд факторов, влияющих на выбор молодежью средства доставки никотина в организм. Это первый этап исследования, необходимый для последующего отслеживания тенденций, связанных с проблемой никотинозависимости в обществе, и выявления причин, препятствующих эффективной реализации антитабачной политики, проводимой в стране.

The aim of this study was to explore the use of tobacco cigarettes and e-cigarettes among the students of NSTU and also to uncover the factors influencing on choose of nicotine delivery systems. This is the first stage of the study of trends related to the problem of nicotine addiction and to the identifying of the reasons hindering the effective implementation of tobacco control policy.

История употребления табака насчитывает не одно тысячелетие. За это время накоплены многочисленные данные о курении как об экологическом факторе, оказывающем негативное влияние как на состояние окружающей среды, так и на здоровье человека [1]. Это послужило основанием для принятия в 2003 г. Рамочной конвенции Всемирной организации здравоохранения по борьбе против табака (РКБТ ВОЗ), и развертывания антитабачной кампании в разных странах мира, включая Россию [2]. Однако проблему зависимости от никотина эти меры не решают. Поиск вариантов доставки никотина в организм иным способом, уменьшающим негативные последствия от курения, привел к появлению электронных сигарет (ЭС).

ЭС позиционируется как более безопасный для организма способ доставки никотина, ограждающий людей от пагубного воздействия табачного дыма, и как потенциальный метод отказа от табачных сигарет (ТС) и избавления от никотиновой зависимости [3].

В России с 2010 года объемы продаж и потребления никотиносодержащей продукции в виде ЭС демонстрируют устойчивый рост [4]. Однако практически отсутствуют исследования, дающие представление о распространенности ЭС в Российской Федерации в

разреze пола, возрастных групп и с учетом социально-демографических характеристик. Анализ потребления ТС и ЭС среди разных социально-демографических групп, оценка факторов, влияющих на их использование, необходимы для выявления и устранения проблем, мешающих эффективной реализации антитабачной кампании, и для защиты здоровья населения.

Целью нашего исследования было получение информации об употреблении табачных и электронных сигарет среди студентов, выявление уровня информированности студентов о негативном воздействии ТС и ЭС и выяснение отношения респондентов к потребителям данных видов продукции.

В опросе приняли участие студенты НГТУ в возрасте от 18 до 28 лет. Метод опроса - добровольное, анонимное анкетирование. Метод составления анкеты был построен на анализе и выборке вопросов, имеющихся в свободном доступе, из массовых опросов об употреблении никотинсодержащей продукции. Выборка респондентов построена на основе полного списка групп студентов ФЛА.

В результате исследования был проведен опрос у 146 человек от 17 до 28 лет (средний возраст - 20 лет), из них 69 мужчин (47%), 77 женщин (53%). Среди анкетированных 95 человек (65%) – некурящие и 51 человек (35%) – курящие, из которых 29 мужчин (20%) и 22 женщины (15%).

Из 51 человека, употребляющих никотинсодержащую продукцию на постоянной основе, 29 человек (20% от общего числа опрошенных) курят ежедневно. Что в целом согласуется с данным ВЦИОМ за 2017 год, где частота постоянного потребления табака среди взрослого населения в возрастной группе от 18 до 24 лет составила 30,5%, а доля «ежедневных курильщиков» в этой возрастной группе составила 25% [5].

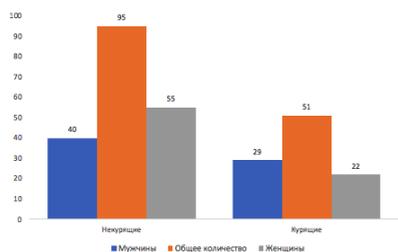


Рис. 1 – Сведения об анкетированных

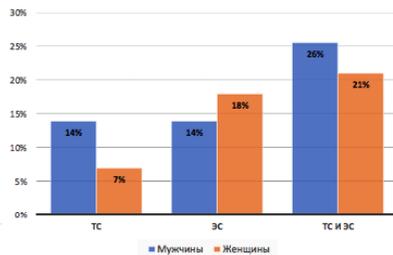


Рис. 2 – Сведения о предпочтениях между ТС и ЭС в разрезе пола

Из общего числа курильщиков 21% употребляют только ТС, 32,5%

только ЭС, 46,5% людей используют как ТС, так и ЭС.

Отношение всех респондентов к людям, курящим ЭС и ТС, распределилось следующим образом: 27% из выборки относятся к пользователям ТС отрицательно, 70% - равнодушно; к пользователям ЭС: 19% - отрицательно, 81% - равнодушно (рис. 3).

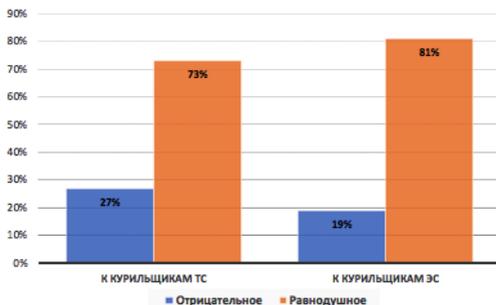


Рис. 3 – Гистограмма, описывающая отношение к курильщикам в разрезе способа доставки никотина

Факт более лояльного отношения к курильщикам ЭС требует дальнейшего изучения. Это может быть объяснено как большей информированностью людей о негативном воздействии табачного дыма на организм курящего и окружающих людей в ходе антитабачной кампании, так и индивидуальными предпочтениями (непереносимостью резкого табачного дыма, запаха).

Из группы курящих (ТС, ЭС) 5% респондентов начали курить до 14 лет, 37% в период с 14 до 18 лет, 58%– после 18 лет (рис. 4).

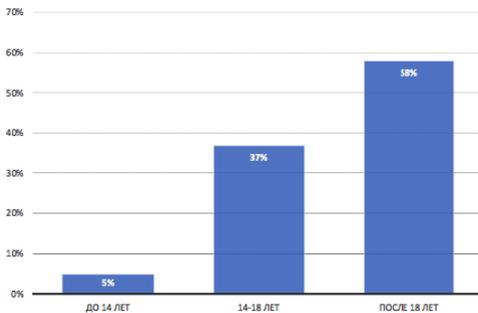


Рис. 4 – Возраст начала употребления никотинсодержащей продукции

Факт начала курения в возрасте до 18 лет свидетельствует о доступности никотинсодержащей продукции несовершеннолетним, несмотря на действующее законодательство.

Из группы курящих только ТС о рисках для здоровья, связанных с курением табака, знают 78% опрошенных. Из группы потребителей только ЭС о рисках, связанных с курением ЭС, осведомлены 14%. Очевидно, что уровень информированности о негативных последствиях употребления табачных сигарет выше у курильщиков ТС. Это может быть объяснено многолетней антитабачной кампанией, которая не распространялась до недавнего времени на ЭС.

Начали курение с ЭС только 6% из общего числа потребителей ЭС, у остальных 94% уже был опыт курения ТС. Таким образом, у основной части опрошенных курильщиков произошло приобщение к никотиносодержащей продукции через ТС.

Из курящих ЭС 15% человек полностью перешли на использование нового способа доставки никотина взамен ТС, а 15% отметили, что ЭС помогла сократить потребление ТС, но полного замещения не произошло.

Из всех потребителей ЭС 62% респондентов ответили, что используют ЭС с целью снизить зависимость от курения с последующим полным отказом, остальные 38% сделали выбор в пользу ЭС, считая их более безопасными, без цели отказа от курения.

Эти данные свидетельствуют о малой осведомленности респондентов об отрицательных эффектах курения ЭС, а также о желании студентов использовать более безопасный способ доставки никотина.

Однако заявления рекламных кампаний о безопасности ЭС, распространяющиеся через СМИ, не подкреплены исследованиями, подтверждающими отсутствие долгосрочных отрицательных эффектов от курения ЭС [6]. Нет данных, подтверждающих снижения никотиновой зависимости с помощью электронных сигарет. Исследования о воздействии на здоровье пропиленгликоля, входящего в жидкость для ЭС, при длительной ингаляции вызывает настороженность [7]. Доказано, что при вдыхании дыма обычных сигарет и аэрозоля ЭС, распыленного в комнате с помощью курительных машин, концентрация никотина в плазме крови испытуемых была примерно одинакова [8]. При рассмотрении ЭС как средства для отказа от курения табака показано, что они должны регулироваться как лекарственные средства. Во многих странах начата процедура разработки таких регламентов на основании результатов установленных законом клинических исследований и доказанных научных работ [9].

В ходе нашего исследования выявлено, что курение -

распространенное и приемлемое явление среди студентов обоих полов. Вместе с тем отношение людей к курильщикам ЭС более лояльное, чем к курильщикам ТС. Большинство уверено, что употребление ЭС более безопасно по сравнению с ТС, что может представлять угрозу для успешной реализации антитабачной политики, проводимой государством. Неосведомленность об опасностях потребления ЭС и доступность никотиносодержащей продукции для несовершеннолетних может повлечь рост потребления ЭС среди лиц молодого возраста.

Литература:

1. Курение как экологический фактор, влияющий на состояние окружающей среды // *Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн.* Сальникова Е.В. [и др.]. 2017. № 7(37)
2. Общий обзор // *FCTC. Рамочная конвенция ВОЗ по борьбе против табака* – URL: https://www.who.int/fctc/text_download/ru/.
3. История создания и продвижения электронных сигарет // Портал «Cyberleninka» – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-sozdaniya-i-prodvizheniya-elektronnyh-sigaret/viewer>.
4. Гамбарян М.Г., Драпкина О.М. Распространенность потребления табака в России: динамика и тенденции. Анализ результатов глобальных и национальных опросов. // *Профилактическая медицина.* 2018;21(5):45-62.
5. Осипов Д. А. Место электронных систем доставки никотина в терапии никотиновой зависимости: современный взгляд на проблему // *Cyberleninka* – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mesto-elektronnyh-sistem-dostavki-nikotina-v-terapii-nikotinovoy-zavisimosti-sovremenny-vzglyad-na-problemu>.
6. Hajek, P. Electronic cigarettes: review of use, content, safety, effects on smokers and potential for harm and benefit / P. Hajek, J.F. Etter, N. Benowitz [et al.] // *Addiction.* — 2014. — Vol. 109, № 11. — P.1801—1810.
7. Zhang Y, Sumner W, Chen DR. In vitro particle size distributions in electronic and conventional cigarette aerosols suggest comparable deposition patterns. *Nicotine Tob Res.* 2013; 15: 501-508.
8. Flouris, A.D. Acute impact of active and passive electronic cigarette smoking on serum cotinine and lung function / A.D. Flouris, M.S. Chorti, K.P. Poulianiti [et al.] // *Inhalation toxicology.* — 2013. — Vol. 25, № 2. — P.91—101.
9. Антонов, Н.С. Электронные сигареты: оценка безопасности и рисков для здоровья / Н.С. Антонов [и др.] // *Пульмонология.* — 2014. — № 3. — С.122—127.

СОЗДАНИЕ НОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ НАФЕН-СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ

Е.П. Вентлянд, В.Н. Панченко

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, katerina.ventlyand@mail.ru

*Последовательным нанесением $MgBu_2$ и $TiCl_4$ на нафенTM, волокнистый нано оксид алюминия, был синтезирован высокоактивный титан-магниевый катализатор (ТМК). Показано, что данный метод синтеза позволяет получать композитные материалы полиэтилен–нафенTM, методом полимеризации *in situ*. Варьируя температуру полимеризации этилена, можно регулировать молекулярную массу получаемого полимера в композите. Вязкоупругие свойства композитов были изучены методом динамического механического анализа (ДМА). Введение нафенаTM (меньше 0.25% вес.) увеличивает модули упругости и вязкости.*

*A highly active titanium-magnesium catalyst (TMC) was synthesized by successive application of $MgBu_2$ and $TiCl_4$ on nafenTM, a fibrous nano aluminium oxide. It has been shown that this synthesis method allows the production of polyethylene NafenTM composite materials by *in situ* polymerization. The molecular weight of the resulting polymer in the composite can be controlled by varying the polymerization temperature of the ethylene. The viscoelastic properties of composites have been studied by dynamic mechanical analysis (DMA). It has been shown that introducing a nafenTM (less than 0.25% weight) increases modulus of elasticity and viscosity.*

Полимерные композитные материалы (ПКМ) широко востребованы в мире. Стоит отметить, что композиты полиэтилена (КПЭ) представляют наибольший интерес. Такие материалы имеют высокую коррозионную стойкость, прочность, теплопроводность, теплостойкость, высокий показатель соотношения прочности к весу изделия и небольшую массу изделия, по сравнению с обычными материалами. Они применяются в различных отраслях, например, электронике, электротехнике, машиностроении, приборостроении, строительстве и т.п.. По экологическим требованиям их считают относительно чистыми материалами из-за их повторной переработки и возможной утилизации.

В последнее время особое внимание уделяют разработке КПЭ, содержащих в качестве наполнителя нано материалы, например, оксид алюминия [1]. Введение небольших количеств (менее 3% вес.) наноразмерных частиц позволяет улучшить физико-механические характеристики КПЭ. НафенTM – волокнистый нано оксид алюминия, является интересным и перспективным материалом для получения ПКМ. НафенTM обладает сверхвысокой механической прочностью и стабильностью [2]. В работе [3] были получены этилен-пропилен-

нафенTM композиты полимеризацией *in situ* в присутствии катализатора $\text{rac-Et(2-MeInd)}_2\text{ZrMe}_2$ /изобутилалюмоксан. Было показано, что рост физико-механических характеристик в ПКМ наблюдается при содержании нафенаTM менее 0.25% масс.

Целью данной работы являлся синтез КПЭ-нафенTM полимеризацией *in situ*. На рисунке 1 (А) представлены микроснимки сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) нафенаTM. Видно, что он состоит из плотно прилегающих друг к другу волокон диаметром 50 нм и длиной более 1 мкм.

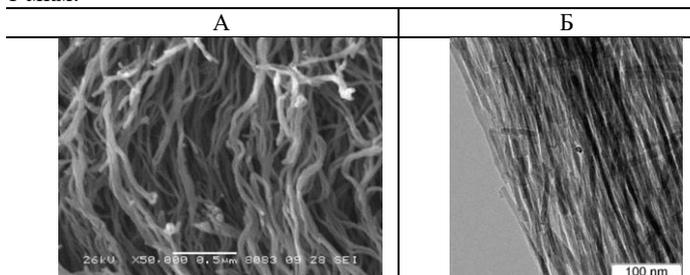


Рис.1 – Микрофотографии нафена СЭМ (А) и ПЭМ (Б)

По данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (рис. 1 (Б)), эти волокна состоят из более мелких нановолокон диаметром 1 нм и длиной 50-100 нм.

КПЭ-нафенTM получали методом полимеризации *in situ* в присутствии катализатора, получаемого последовательным нанесением MgBu_2 и TiCl_4 на предварительно дегидроксилированный при 700 °С нафенTM. Данный катализатор содержал 5.26 вес. % Ti. Метод *in situ* является наиболее привлекательным с точки зрения экологии.

Было показано, что активность катализатора зависит от температуры полимеризации (табл.1). Максимальная активность наблюдается при 80 °С (2387 гПЭ/гКат). Молекулярная масса ПЭ (M_n) с увеличением температуры (с 30 до 80 °С) снижается (с $9.8 \cdot 10^6$ до $1.5 \cdot 10^6$ г/моль) (табл.1 опыты 1,4).

На рисунке 2 приведены микрофотографии порошков КПЭ-нафенTM. Видно, что КПЭ представляют собой рыхлые бесформенные агломераты размером 500-1000 мкм (рис.2 (А)). Эти агломераты состоят из мелких частиц размером 0.5-1мкм (рис.2 (Б и В)).

Таблица 1 – Влияние температуры в полимеризации этилена (Т) на активность и молекулярную массу получаемого ПЭ (M_n)

№ п.п	Т, °С	Выход ПЭ, г	Активность, гПЭ/гКат	M _n ·10 ⁻⁶ , г/моль
1	30	6.4	64	9.8
2	40	7.44	248	6.2
3	60	6.1	310	2.0
4	80	35.8	2387	1.5

Примечание –Условия полимеризации: давление этилена 4 атм, гептан 250 мл, ТЭА 4 мкмоль/л, опыт 1-3 – 1 час, опыт 4 – время 30 минут.

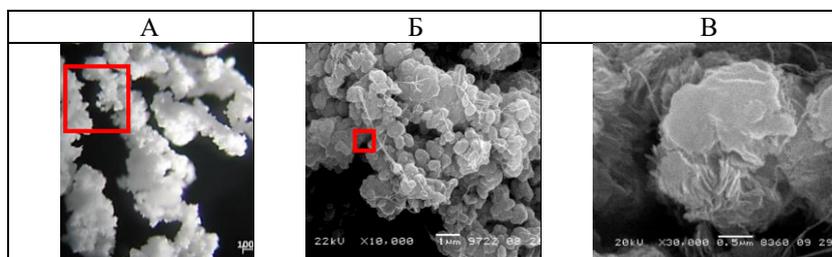


Рис.2 – Микрофотография (А) и данные сканирующей электронной микроскопии (Б) ПЭ

КПЭ-нафенTM имеют низкую насыпную плотность (69 кг/л) по сравнению со стандартным ТМК (400 кг/л), что связано с морфологией полимера (табл.2).

Таблица 2 – Физико-механические характеристики, полученных полиэтиленов

№ п.п	Тп, °С	Содержание нафена, % вес.	Насыпной вес, кг/л	Модуль упругости (E'), МПа	Модуль вязкости (E''), МПа
1	80	0.25	69	2471	183
2*	–	–	400	2320	177.7

* – Стандартный микро-ТМК

Примечание –Условия полимеризации: давление этилена 4 атм, гептан 250 мл, ТЭА 4 мкмоль/л

Методом динамического механического анализа (ДМА) были изучены вязкоупругие свойства КПЭ-нафенаTM. Было показано, что

введение 0.25% вес. нафенаTM увеличивает модули упругости (E') и вязкости (E'') на 6.5 и 3 % вес. соответственно (табл. 2).

Проведенное исследование показало, что:

– композитные материалы КПЭ-нафенTM можно получать полимеризацией *in situ* в присутствии ТМК, синтезированного последовательным нанесением $MgBu_2$ и $TiCl_4$ на предварительно дегидроксилированный при 700 °С нафенTM.

– активность титан-магниевого катализатора зависит от температуры полимеризации;

– варьируя температуру полимеризации этилена можно регулировать молекулярную массу получаемого ПЭ;

– ведение НафенаTM увеличивает вязкоупругие свойства материалов.

С экологической точки зрения, НафенTM-содержащие катализаторы являются перспективными катализаторами. Они долговечны, имеют лучшие физико-химические характеристики в сравнении с обычными материалами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект № АААА-А17-117041710085-9)

Литература:

1. I. E. Nifant'ev, O. V. Smetannikov, A. N. Tavtorkin, M. S. Chinova, P. V. Ivchenko. Titanium–Magnesium Nanocatalysts of Polymerization (Review) // *Petroleum Chemistry Journal*.–М. –2016.– Vol. 56, No. 6.– P. 480-490.

2. Patent US 2013/0192517A1, C30B 9/00 United States. Method and system for alumina nanofibers synthesis from molten aluminum / Kutuzov M.– applicant: ANF Technology Limited, Warlingham; filed: 31.01.2013; pub. date: 1.08.2013.

3. N.M. Bravaya, et al. Influence of silane coupling agent on the synthesis and properties of nanocomposites obtained via *in situ* catalytic copolymerization of ethylene and propylene in the presence of modified NafenTM Al_2O_3 nanofibers // *Polymer*. –2019. –Vol. 174. – P. 114–122.

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРАВ ГРАЖДАН ПО СРЕДСТВАМ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Д.А. Власова, Е.И. Цускман

**Новосибирский государственный университет экономики и
управления «НИНХ», vlasova.da2001@gmail.com**

Работа посвящена вопросам реализации прав граждан на достоверную информацию о состоянии окружающей среды, по средствам инициативных отчетов крупных предприятий, ведущих деятельность по внедрению системы экологического менеджмента по стандартам ISO14000 на примере Кемеровской области.

The paper is devoted to the implementation of citizens' right to obtain accurate information on the environment conditions based on environmental reports, issued by companies acting regarding to the implementation of ISO 14000 environmental management standards, on the basis of Kemerovskiy region.

Экологическая безопасность - состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий. [4]

Таким образом, экологические права, их реализация и защита являются одним из составных элементов обеспечения экологической безопасности. Конституцией Российской Федерации в ст. 42 установлено следующее: «Каждый имеет право на благоприятную окружающую среду, достоверную информацию о ее состоянии и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим правонарушением. [3]

Особого внимания заслуживает право граждан на достоверную информацию о состоянии окружающей среды, так как это право находит наименьшее отражение в российском законодательстве. Конституционный суд РФ безусловно признает это право, но не дает системного толкования его содержания (в том числе во взаимосвязи с ч.33 ст. 55 Конституции РФ). С практической точки зрения такая правовая неопределенность ведет к ситуации, в которой невозможно получение достоверных сведений о воздействии конкретных природопользователей на локальном уровне.

На практике это выражается во множестве формальных отказов в предоставлении информации о состоянии окружающей среды, оспорить которые крайне сложно. Невелико число граждан, обратившихся за

судебной защитой своих экологических прав, а внесудебные системные механизмы реализации и защиты прав гражданина достоверную информацию о состоянии ОС на локальном уровне отсутствуют. Хотя в п.2 абз. 2-3 Постановления Конституционного суда РФ от 02.06.2015 г № 12-П в системном толковании признано, что обязанность за предоставление достоверной информации о состоянии ОС прямо лежит на субъекте экологических правоотношений, оказывающих какое-либо значимое воздействие на ОС, как природопользователь. [2]

Решение этой проблемы лежит не только в нормативно-правовом поле, но и в поле организационно-экономическом. При ведении бизнеса необходимо придерживаться определённого курса развития и иметь устойчивый подход к модернизации системы управления. Формируется новая экологическая бизнес-этика.

Экологическая этика формирует пространство социальной ответственности бизнеса – ответственности за охрану окружающей среды и экологическую безопасность. Наиболее эффективным способом демонстрации экологической состоятельности предприятия является экологическая отчётность, которая рассматривается в качестве одной из основ современной промышленной экологической культуры и экологической культуры предпринимательства в целом. Различают два основных вида экологической отчётности предприятий: государственная (обязательная) и инициативная (добровольная).

Государственная экологическая отчётность – это совокупность различных информационных документов о планах и результатах природоохранной деятельности предприятия, но для узкого круга специалистов, и не даёт возможности для его активного использования в системе производственного управления.

Инициативный экологический отчёт – документ, разрабатываемый предприятием на добровольной основе и содержащий детальную достоверную информацию об экологических аспектах деятельности предприятия. [5]

В большинстве своем предприятия-природопользователи публикуют инициативные отчеты внедрившие систему экологического менеджмента по стандарту ISO 14001, который предполагает активное взаимодействие с заинтересованными сторонами (в частности, с местным населением, то есть с гражданами) в отношении значимых экологических аспектов своей деятельности.

Рассмотрим механизм реализации прав граждан на достоверную информацию о состоянии окружающей среды в Кемеровской области. Согласно Докладу о состоянии и охране ОС Кемеровской области – Кузбасса в 2019 году основными предприятиями – источниками

загрязнения являются предприятия по добыче полезных ископаемых, предприятия обрабатывающего производства, производства и распределения электроэнергии, газа и воды.[1]

Опираясь на составленный интернет-изданием Эксперт-online рейтинг «100 крупнейших предприятий Кемеровской области» осуществим выборку 15 крупнейших предприятий – загрязнителей и проанализируем их деятельности с точки зрения их роли в реализации прав граждан на достоверную информацию, опираясь на информацию представленную на официальных сайтах компаний. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Предоставление инициативных отчетов компаниями, работающими на территории Кемеровской области

Место в рейтинге	Компания	СЭМ по стандарту ISO14001	Экологическая политика	Экологический отчет	Экопросвещение
1.	Западно-Сибирский металлургический комбинат	+	+	+	+
2.	Новокузнецкий металлургический комбинат	-	-	-	-
3.	ОУК «Южкузбассуголь»	-	-	-	-
4.	УК «Кузбассразрезуголь»	+	+	+	+
5.	Кузбассэнерго	+	+	+	+
6.	УК «Южный Кузбасс»	-	+	+	+
7.	Сталь НК	-	-	-	-
8.	Распадская угольная компания	-	-	-	-
9.	Кокс	+	+	+	+
10.	Евразруда	+	+	+	+
11.	Металлэнергофинанс	-	-	-	-
12.	Кузбасснефтепродукт	-	-	-	-
13.	Сибуглемет	-	-	-	-
14.	Новокузнецкий алюминиевый завод	+	+	+	+
15.	СДС Азот	+	+	+	+

В таблице представлено 4 предприятия чёрной металлургии, 6 предприятий угольной и коксохимической промышленности, 2 предприятия электроэнергетики, 1 предприятие химической и нефтехимической промышленности, 1 предприятие цветной металлургии, 1 предприятие торговли. Только 8 из них ведут работу по внедрению СЭМ, имеют экологическую политику, публикуют

инициативные экологические отчеты и взаимодействуют с местным населением. Если же рассматривать предприятие меньшего масштаба статистика будет еще плачевнее.

Таким образом можно сделать следующие выводы - отсутствует комплексный подход к обеспечению реализации прав граждан на достоверную информацию о состоянии окружающей среды;

- в большинстве своем граждане не знают о том, что их право нарушается, по причине экологической неграмотности;- необходимо на государственном уровне поддерживать компании, публикующие инициативные экологические отчеты, в рамках системы экологического менеджмента;

- следует популяризировать практику внедрения СЭМ на предприятиях всех отраслей;

- необходимо организовать систему верификации данных, представленных в отчетах данных, к примеру, по средствам экологического аудита.

Литература:

1. Доклад о состоянии окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2019 году [Электронный ресурс] URL: <http://ecokem.ru/wp-content/uploads/2020/09/gosdoclad2019.pdf> Дата доступа: 20.10.2020.

2. Конституционный суд российской федерации постановление от 2 июня 2015 г. N 12-П [Электронный ресурс] URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?rnd=2EDEBF8E3E299856D17DE99A938CEDBA&req=doc&base=ARB&n=427782&REFFIELD=134&REFDST=100734&REFDOC=559975&REFBASE=ARB&stat=refcode%3D10881%3Bindex%3D805#13pfs453fzi> Дата доступа: 12.11.2020.

3. Статья 42 Конституции Российской Федерации [Электронный ресурс] URL: <http://constitutionrf.ru/rzd-1/gl-2/st-42-krf> Дата доступа: 12.11.2020.

4. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 31.07.2020) "Об охране окружающей среды" [Электронный ресурс] URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/#dst100049 Дата доступа: 12.11.2020.

5. *Ферару Г.С.*, Экологический менеджмент: учебник для студентов бакалавриата и магистратуры. – Ростов н/Д:Феникс, 2012.- С.323-324. Дата доступа: 12.11.2020.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕКУПЕРАЦИОННЫХ ГОРЕЛОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА (NO_x) ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

К.Е. Квашнина, Т.А. Коротаева

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, clarascintilla3107e@mail.ru**

Проведён анализ научной литературы по теме способов снижения загрязняющих атмосферу веществ, в результате использования углеводородного топлива. Рассмотрен процесс рекуперации и рекуперативного оборудования в виде горелок для использования их в промышленности, а также рассмотрено использование дымовых газов.

The analysis of scientific literature on the topic of ways to reduce air pollutants, as a result of the use of hydrocarbon fuel. The process of recuperation and recuperative equipment in the form of burners for their use in industry is considered, and the use of flue gases is also considered.

Для того, чтобы производство энергии приносило минимальный ущерб окружающей среде, необходимо заострить внимание на вопросе по сокращению выбросов в атмосферу. Основными проблемами при получении энергии из газообразного или твёрдого топлива являются отходящие дымовые газы и образование и присутствие в них оксидов азота (NO_x), углерода (CO_x), диоксид серы (SO₂) и остатки несгоревших углеводородов C_xH_y. Также можно использовать то тепло, которое образуется при сжигании топлива.

Наилучшим способом снизить содержание вредных выбросов в процессе является совершенствование технологий сжигания топлив, а также использование мероприятий для очистки газов [2].

Таковыми способами являются:

1) Сжигание топлив с избытком окислителя.

Достоинства:

- Распространённый способ снижения выбросов окислов азота;
- Наибольшая эффективность способа достигается при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,03 \dots 1,05$.

- Максимум концентрации NO_x соответствует такому коэффициенте избытка α , при котором в рассматриваемых условиях достигается наиболее полное сгорание топлива.

Недостатки:

- Избыток воздуха приводит к увеличению выбросов канцерогенов, твёрдых частиц, а также окиси углерода. Данный факт противоречит требованиям защиты атмосферы.

В итоге, сжигание топлива с избытком окислителя без значительного образования выбросов продуктов неполного сгорания можно добиться при совершенствовании горелочного оборудования.

2) Подвод дымовых газов в зону горения. Рециркуляция продуктов сгорания – это подвод газов, образовавшихся в процессе сжигания топлива, в зону горения.

Достоинства:

– Концентрация NO_x снижается и за счёт низкой температуры рециркуляционных газов, но и снижением температуры горения из-за уменьшения скоростей цепных реакций вследствие присутствия инертных газов и снижения концентраций реагирующих веществ;

– Ввод продуктов сгорания эффективен в воздуховоды перед горелками или подача их в камеру сгорания через отдельные каналы.

Недостатки:

– Дорогостоящий процесс организации рециркуляции продуктов сгорания в зону горения, т.е. требует дополнительных ресурсов на установку оборудования;

– На КПД устройства данный метод почти не оказывает влияние.

3) Двухступенчатое, или двухстадийное сжигание. На первой стадии горения осуществляется сжигание топлива при недостатке окислителя, а на второй – дожигание продуктов газификации при пониженных температурах. Данный способ предусматривает такое горение топлива, когда через горелочное устройство с топливом подаётся окислитель с коэффициентом избытка воздуха α меньшем, чем обычно $\alpha = 0,8 \dots 0,95$.

Достоинства:

– Из-за пониженной концентрации кислорода в факеле уменьшается образование оксидов азота;

– Температурное снижение на второй стадии уменьшает образованием термических оксидов азота.

Основной недостаток – трудность при организации данного метода – это правильность определения места подвода воздуха второй стадии и его количества. Окислитель должен быть введён так, чтобы обеспечить полное смешение с продуктами из первой стадии, чтобы произошло дожигание. Недостаточное смешение на этой стадии приведёт к увеличению вредных выбросов.

Чтобы использовать теплоту дымовых газов для подогрева воздуха горения были разработаны рекуперативные горелки. Они могут быть использованы в технологическом процессе при высокой рабочей температуре $700 \dots 1100$ °С. Данное устройство представляют собой металлоемкую конструкцию, расположенную после основной камеры сгорания. Установка таких горелок экономически выгодна только для

печей большой производительности. Достоинством этих систем являются компактность и высокая степень утилизации теплоты благодаря малым теплопотерям [1].

Рекуператор - теплообменник, который обеспечивает, подогрев поступающего воздуха горения за счет тепловой энергии отходящих газов. Рекуператор может обеспечить экономию около 30% энергии по сравнению с системой, использующей холодный воздух горения. Однако рекуператор, как правило, неспособен обеспечить подогрев воздуха до температуры, превышающей 550...600 °С.

Значительную роль играет расположение и конструкция теплообменника. Имеется существенное различие между конвекционной системой с центральным рекуператором и рекуперативными горелками (рис.1).

Для системы с центральным рекуператором вентили горячего воздуха должны работать на каждой горелке при воздействии высокой температуры и при давлении от 2...6 кПа с высокой частотой включения. Также возникает проблема с равномерным распределением горячего воздуха на каждую отдельную горелку.

При использовании рекуперативных горелок нет, необходимых для центрального рекуператора, воздушного короба и трубопровода на «горячей» стороне для подачи подогретого воздуха. Отходящие газы собираются в коллектор.

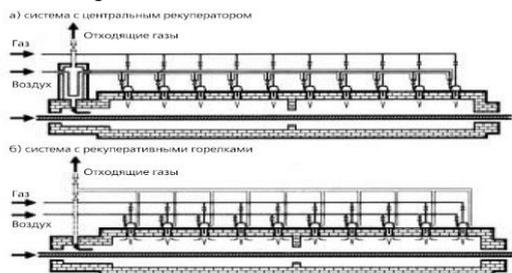


Рис. 1 – Система с центральным рекуператором и рекуперативными горелками

Также проточные каналы и поверхность теплопередачи в рекуперативных горелках лучше оптимизированы, чем при использовании системы с центральным рекуператором. Благодаря этому достигается более высокая удельная мощность теплопередачи.

В настоящей работе представлены результаты первого этапа исследования. Для простой модели рекуператора, представляющей собой теплоизолированный канал при наличии в нем инертной вставки

разной конфигурации, рассматривается горение смеси окислителя с метаном и проводится анализ распределения параметров в канале.

Литература:

1. Рекуперативные горелки для промышленных печей *J. Wu-ning, WS GmbH*. – 2007. – Т. 17. – № 9. – С. 30-35
2. Бирюков А.Б. Современные аспекты использования рекуперативных горелок для отопления пламенных печей. А.Б. Бирюков // Бюллетень «Черная металлургия». – 2015. – №11. – С. 31-36.

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АБРАЗИВНОЙ ПЫЛИ НА РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ

А.С. Копаненко, А.В. Гуськов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kopanenko12@mail.ru**

В данной работе представлен обзор научно-технической документации по вопросу влияния металло-абразивной пыли на состояние здоровья работника и износ механизмов оборудования.

This paper provides an overview of scientific and technical documentation on the impact of metal-abrasive dust on the health of an employee and wear of equipment mechanisms.

Технологические процессы при абразивной обработке металлов сопровождаются значительными выделениями пыли в рабочем пространстве. По степени негативного воздействия на работников металло-абразивная пыль отнесена к мало опасным веществам (IV класс) [1]. Однако, она обладает абразивными свойствами, относится к аэрозолям преимущественно фиброгенного действия. Поэтому в производственных условиях вызывает аллергические реакции. Аэрозоли фиброгенного действия – производственная пыль способная вызывать пылевые заболевания легких, основными из которых являются силикозы, пылевые бронхиты, пневмокониозы (т. е. под воздействием которых в легких происходит разрастание соединительной ткани, нарушающее нормальное строение и функции органа.) Постоянный контакт с металло-абразивной пылью приводит к различным заболеваниям не только органов дыхания, но и кожи и глаз.

Кроме того, песок, содержащий кремнезем, широко используется в литейных цехах для литья металла и абразивоструйной очистки [2]. Потенциал воздействия кристаллического кремнезема, переносимого по

воздуху, и связанный с ним риск заболевания могут быть значительными, если абразивно-струйные операции проводятся без надлежащего контроля содержания пыли в воздухе рабочей зоны.

Проведенный обзор исследований, связанных с абразивной обработкой, выделены направления на улучшение технологического процесса, на снижение пылевых выбросов в атмосферу, но не на решение проблем обеспыливания рабочей зоны [3-6]. При этом важным методом борьбы с пылевым загрязнением рабочей зоны не в полной мере учитывают дисперсный состав и основные свойства металло-абразивной пыли, поступающей при выполнении различных технологических операций по абразивной обработке материалов. Также недостаточно изучены процессы распространения и оседания пыли, образующейся при абразивной обработке. Поэтому исследования, направленные на изучение перечисленных факторов, определяющих формирование пылевой обстановки в области рабочей зоны, являются актуальными.

В настоящее время, хорошо изучено патогенное влияние пыли на организм человека, размер частиц пыли является важным фактором. Особую опасность представляют собой части, которые способны проникать в альвеолы и периферии легкого [7]. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует осуществлять нормирование содержания в воздухе рабочей зоны частиц пыли с размерами не более 2,5 мкм и (или) 10 мкм. В Российской Федерации нормирование запыленности в воздухе рабочей зоны происходит без оценки дисперсного состава.

Не смотря на многие теоретические исследования и практические разработки в данной области, в настоящее время отсутствует единая методология для комплексной оценки пылевой обстановки на рабочем месте.

Так же пыль является источником износа механизмов, узлов, открытых частей оборудования, которое находится в непосредственной близости с абразивными установками [8]. Данное явление называется абразивным износом. Он заключается в разрушении поверхностного слоя материала в ходе контакта с более твердыми частицами других материалов. Абразивный износ происходит под ударами частиц абразивного материала, окалины и металла.

Проведя обзор научных исследований, выделен спектр направлений:

- улучшение технологического процесса;
- снижение пылевых выбросов в атмосферу.

Выделенный спектр направлений исследования не учитывает важный фактор формирования среды и влияния ее на рабочее пространство, оборудование, состояние здоровья работника.

Необходимо разработать метод определения дисперсного состава металло-абразивной пыли в области рабочей зоны. Это имеет важное значение для улучшения условий труда работников и увеличения срока службы промышленного оборудования.

Литература:

1. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности

2. Копаненко А. С. Исследование концентрации металлической и абразивной пыли при пескоструйной обработке / А. С. Копаненко; науч. рук. А. В. Гуськов // Дни науки НГТУ–2020, посвященные 70-летию НГТУ: материалы науч. студен. конф., итоги науч. работы студентов за 2019–2020 гг. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – С. 80–84

3. Сибатуллин С.К. Оптимальная степень прямого восстановления железа из оксидов // Сталь. 1997. №4. С.1-5

4. Erdoğan, A. and Altaş, E. Experimental study on micro-abrasion behavior of hard coatings: the role of load, sliding distance and abrasive particle size // Materials Research Express, vol. 6, no. 11, 2019. doi:10.1088/2053-1591/ab47ad.

5. Benjamin Krawczyk and D. L. Engelberg, Effect of Aqua Blasting, Sandblasting and Laser Engraving on the Corrosion Resistance of Type 316 Stainless Steel // ВМ (2016) Vol. 161 (1): 50–55

6. Терентьев Д.В. Исследование количества твердых осадений и пути их уменьшения с целью повышения ресурса узлов и механизмов доменных печей // Металлургия черных, цветных и редких металлов. 2020 Т.18 №3 С.28-34

7. Дисперсный состав пыли как критерий патогенности аэрозольного загрязнения воздуха/Д.Н. Козлов, А.Н. Кузнецов, И.И. Турковский // Гигиена труда. -2003.-№1.-С. 45-47.

8. Kh. K. Ishmuratova and B. A. Irgashev, Assessment of the Wear Resistance for Gearwheel Teeth in an Open Toothed Gear under the Conditions of a High Level of Dust // Journal of Friction and Wear, 2020, Vol. 41, No. 1, pp. 85–90

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ NiCu-КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СИНТЕЗ-ГАЗ

А.Ю. Коренюк¹, Е.В. Матус^{1,2}, М.А. Керженцев²

¹ Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск,

² Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск, alineks.07@mail.ru

С целью разработки эффективных катализаторов конверсии метана в синтез-газ проведен синтез NiCu-катализаторов на основе диоксида церия методом сложноэфирных полимерных предшественников. Комплексом физико-химических методов (низкотемпературная адсорбция азота, рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия) исследованы текстурные, структурные и морфологические свойства материалов. Показано, что NiCu/CeO₂ – мезопористые материалы с удельной поверхностью 100 ± 10 м²/г. В катализаторах присутствует фаза флюоритоподобного твердого раствора на основе CeO₂ со средним размером кристаллитов 7.0 нм. Перспективным является использование полученных NiCu-катализаторов в процессах окислительного риформинга метана в синтез-газ.

With the aim of developing effective catalysts for the conversion of methane into synthesis gas, the preparation of NiCu catalysts based on cerium dioxide was carried out by the method of ester polymer precursors. A complex of physicochemical methods (low-temperature nitrogen adsorption, X-ray phase and X-ray structural analysis, transmission electron microscopy, scanning electron microscopy) has been used to study the texture, structural and morphological properties of materials. It is shown that NiCu/CeO₂ samples are mesoporous materials with a specific surface area of 100 ± 10 m²/g. The catalysts contain a phase of a fluorite-like solid solution based on CeO₂ with an average crystallite size of 7.0 nm. The use of the obtained NiCu catalysts in the processes of oxidative reforming of methane into synthesis gas is promising.

1. Введение

Метан – ценный ресурс для производства различных химических продуктов. Он является основным компонентом природного газа, попутного нефтяного газа, а также входит в состав альтернативных видов газового углеводородного сырья – шахтного метана и биогаза. Окислительная конверсия метана в синтез-газ является основным способом его химической переработки (рис. 1).

Алканы, олефины, спирты

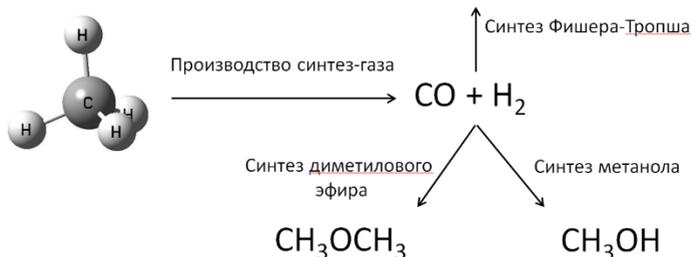


Рис. 1 – Пути получения химических продуктов из метана

Разработка эффективных катализаторов для процессов окислительной переработки метана является актуальной задачей. Нанесенные на различные носители (Al_2O_3 , La_2O_3 , CeO_2) Ni-катализаторы представляют собой высокоактивные в процессах риформинга системы [1]. Для улучшения их термостабильности и устойчивости к зауглероживанию в состав катализатора вводят промотирующие добавки. Как правило, это небольшие количества (менее 1 мас. %) благородных металлов – Pd, Pt, Rh [2]. Представляет интерес использование в качестве промоторов более доступных и дешевых металлов (Cu, Sn, Mo). В настоящей работе, с целью разработки эффективных катализаторов конверсии метана в синтез-газ проведен синтез и исследование физико-химических свойств NiCu-катализаторов на основе диоксида церия при варьировании мольного соотношения Cu/Ni.

2. Методика экспериментального исследования

Синтез катализаторов NiCu/ CeO_2 проводили методом сложноэфирных полимерных предшественников [3]. Мольное соотношение (Ni+Cu)/Ce было постоянно и составляло 0.25:0.75, в то время как величина Cu/Ni варьировалась и была равной 0.004, 0.04, 0.25.

Для исследования текстурных, структурных и морфологических свойств образцов использовали комплекс физико-химических методов (низкотемпературная адсорбция азота, рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия).

3. Результаты и обсуждения

В таблице 1 приведен перечень и химический состав полученных образцов. При варьировании мольного соотношения Cu/Ni от 0.004 до 0.25 при постоянном значении (Ni+Cu)/Ce содержание активного

компонента Ni в образцах снижается от 9.9 до 7.9 мас. %, а содержание промотора Cu увеличивается от 0.004 до 2.2. мас.%.

Согласно данным низкотемпературной адсорбции азота, для исследуемых материалов наблюдается IV тип изотермы адсорбции с петлей гистерезиса типа H3, что свидетельствует о присутствии в образцах мезопор. Зависимость текстурных характеристик от мольного соотношения Cu/Ni носит немонотонный характер. Так, максимальное значение удельной поверхности ($S_{БЭТ}$) наблюдается при Cu/Ni = 0.04 и составляет 122 м²/г. Для остальных образцов $S_{БЭТ}$ ~ 100 м²/г. Объем пор изменяется в диапазоне 0.3–0.6 см³/г, средний диаметр пор – 12–19 нм.

Таблица 1 - Химический состав катализаторов NiCu/CeO₂

Образец	Мольное соотношение Cu/Ni	Химический состав, мас. %		
		Ce	Ni	M
NiCu/CeO ₂	0.004	71.1	9.9	0.04
NiCu/CeO ₂	0.04	71.1	9.5	0.4
NiCu/CeO ₂	0.25	71.0	7.9	2.2

Катализаторы представляют собой агломераты частиц неправильной формы и разного размера. Частицы обладают рыхлой структурой и имеют развитую полидисперсную систему пор. Изменение мольного соотношения Cu/Ni не оказывает заметного влияния на морфологию частиц.

Исследование катализаторов методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии показало, что образцы однофазные и содержат в своем составе фазу флюоритоподобного твердого раствора на основе диоксида церия со средним размером кристаллитов 7 нм. Параметр элементарной ячейки материалов ниже, чем для немодифицированного диоксида церия, что подтверждает вхождение катионов никеля и меди в решетку диоксида церия. Активация материалов в восстановительной среде приводит к формированию высокодисперсных NiCu частиц на поверхности диоксида церия.

Перспективным является использование полученных NiCu-катализаторов в процессах окислительного риформинга метана в синтез-газ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИК СО РАН (проект АААА-А17-117041710090-3)

Литература:

1. Разработка нанесенных никельсодержащих катализаторов для автотермического риформинга метана / Е. В. Матус, С. Д. Васильев, И. З. Исмагилов, В. А. Ушаков, М. А. Керженцев, З. Р. Исмагилов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – № 4. – Т. 28. – С.417–425.
2. Ni-based bimetallic heterogeneous catalysts for energy and environmental applications / S. De, J. Zhang, R. Luque, N. Yan // Energy Environmental Science. – 2016. – V. 9. – P. 3314–4337.
3. Genesis and Structural Properties of $(\text{Ce}_{1-x}\text{M}_x)_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{O}_y$ (M = La, Mg) Oxides / E. V. Matus, I. Z. Ismagilov, V. A. Ushakov, A. P. Nikitin, O. A. Stonkus, E. Y. Gerasimov, M. A. Kerzhentsev, P. Bharali, Z. R. Ismagilov. // Journal of Structural Chemistry. – 2020. – N7. – V.61. – P.1080–1089.

ПОЛУЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОТХОДОВ ДРОБЛЕНИЯ ГРАНИТНОГО ЩЕБНЯ

А.В. Лапин¹, Л.К. Бердникова², Ф.К. Горбунов^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,

г. Новосибирск, tto4ta-1996@mail.ru

Проведено исследование по разработке методики получения строительных материалов на основе отходов дробления гранитного щебня, стеклобой и силикатного связующего. Варьируя температуру обработки, удалось повысить водостойкость изделий и нейтральность pH поровой жидкости. Наибольшими физико-механическими показателями обладают изделия, обработанные при температуре 500-700 °С, при этом прочность при изгибе и сжатии составили 1,9-6,2 МПа и 19,6-23,5 МПа, соответственно.

A study was conducted to develop a method for obtaining building materials based on waste crushed granite, cullet and silicate binder. By varying the processing temperature, it was possible to increase the water resistance of products and the pH neutrality of the pore liquid. The highest physical and mechanical characteristics are products processed at a temperature of 500-700 °C, while the flexural and compressive strength was 1.9-6.2 MPa and 19.6-23.5 MPa, respectively.

В качестве наполнителя для получения образцов использовали полифракцию (0,14-7 мм) отхода дробления гранитного щебня (отсев) из карьера Борок города Новосибирска, в качестве модифицирующей добавки – стеклобой, размер зерен (d) которого составлял ≤ 14 мм.

В качестве сырья для получения связующего компонента с различным силикатным модулем использовали раствор гидроксида натрия и диатомит Инзенского месторождения, предварительно обожженный при

температуре 900 °С. Методика получения связующего была описана в работе [1]. Методика получения строительных изделий представлена в работе [2].

Первый этап исследований заключался в определении оптимального соотношения наполнителя и связующего (далее Н/С) с силикатным модулем (М) 2 при температуре обработки 50 °С. Критерием оптимальности является наибольшая прочность изделий. Результаты полученных физико-механических характеристик образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики образцов в зависимости от соотношения Н/С

Н/С, %	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа		Вид связующего
		при изгибе	при сжатии	
80/20	2,06	4,3	8,2	Фильтрат (М = 2)
85/15	2,00	6,5	16,6	Фильтрат (М = 2)
90/10	1,81	4,2	8,8	Фильтрат (М = 2)
85/15	1,93	3,0	8,2	Осадок
90/10	1,67	1,1	4,7	Осадок

Анализируя таблицу 1, можно сделать вывод о том, что лучшими физико-механическими свойствами обладают изделия, изготовленные на основе фильтрата (связующее М = 2). При этом оптимальное соотношение наполнителя и связующего составляет 85/15 %. Такое соотношение позволяет получать изделия, обладающие высокими прочностными характеристиками, при этом прочность при сжатии и изгибе составила 16,6 и 6,5 МПа, соответственно.

Второй этап исследования заключался в исследовании прочностных характеристик, водостойкости и рН поровой жидкости изделий, полученных при соотношении Н/С = 85/15 %, в зависимости от условий термообработки. Для изготовления образцов применяли фильтрат связующего с модулем 3, температуру обработки варьировали от 50 до 900 °С. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 2.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что оптимальная температура обработки изделий составляет от 500 до 700 °С, при этом прочностные характеристики следующие: прочность при изгибе – от 2,0 до 2,5 МПа, при сжатии от 7,9 до 16,9 МПа. Термообработка при более 500 °С привела увеличению водостойкости изделий, коэффициент размягчения составил более 0,8. Так же было

определено, что при температуре обработки 700 °С и выше происходит оплавление (стеклование) изделий и показатель рН поровой жидкости сильнощелочной во всем диапазоне температур.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики изделий в зависимости от условий термообработки

№	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа		рН	Водопоглощение, %	Температура обработки, °С	Коэффициент размягчения
		при изгибе	при сжатии				
1	2,14	10,9	22,4	12,7	-	50	0,12
2	2,07	4,4	15,0	12,5	5,8	200	0,43
3	2,07	4,6	17,4	12,4	5,4	300	0,55
4	2,06	3,8	16,9	12,4	5,8	400	0,55
5	2,02	2,3	9,8	12,2	7,8	500	0,80
6	1,00	2,0	7,9	12,2	7,7	600	0,91
7	1,90	2,5	10,6	10,7	6,8	700	0,92
8	1,99	1,1	19,6	10,2	7,6	800	0,90
9	-	3,2	13,7	9,5	7,5	900	0,95

Снижение рН поровой жидкости образцов стало целью третьего этапа исследования. Для этого в процессе изготовления в исходные компоненты вводили модифицирующую добавку (стеклобой, d ≤ 14 мм) в количестве 10% от общей массы смеси (таблица 3).

Из полученных данных (таблица 3) видно, что введение стеклобоя приводит к снижению рН поровой жидкости изделий до нейтрального при температуре обработки 700 °С. Изделия становятся водостойкими при термообработке от 400 °С и выше, коэффициент размягчения составил 0,82 и выше. При температуре обработки 800 °С образцы обладают максимальными физико-механическими характеристиками: прочность при изгибе – 7,8 МПа, прочности при сжатии – 23,5 МПа.

Таблица 3 – Физико-механические характеристики изделий, полученных с добавлением стеклобоя в качестве модификатора, в зависимости от условий термообработки

№	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа		рН	Водопоглощение, %	Температура обработки, °С	Коэффициент размягчения
		при изгибе	при сжатии				
1	2,13	2,5	15,7	12,5	5,2	200	0,75
2	1,72	1,4	19,6	12,2	5,4	300	0,70
3	2,13	2,3	19,6	10,5	5,9	400	0,90
4	2,17	1,9	21,6	8,6	6,1	500	0,82
5	1,91	4,1	19,6	8,2	7,0	600	0,90
6	2,10	6,2	23,5	7,2	7,0	700	0,83
7	2,04	7,8	23,5	10,3	5,9	800	0,95

Литература:

1. Вяжущее из отходов динового 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.

2. 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. Булгаков // В сборнике: Материалы 6-ой международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции «Химические технологии функциональных материалов». Издательский дом «Қазақ университеті». 2020. ISBN 978-601-04-4624-3, С. 32-36.

СИНТЕЗ N-ФОРМИЛАНИЛИНА ИЗ АНИЛИНА И МУРАВЬИНОЙ КИСЛОТЫ В ПРИСУТСТВИИ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА КЛИНОПТИЛОЛИТА, МОДИФИЦИРОВАННОГО АЗОТНОЙ КИСЛОТОЙ

Б.Д. Лапташ, М.Н. Тимофеева

**Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, bogdan.laptash@gmail.com**

В работе приведены результаты исследования влияния кислотной активации природного цеолита клиноптилолита, модифицированного 0.125-3.0 М азотной кислотой, на выход N-формиланилина в реакции N-формилирования анилина муравьиной кислотой. Показано, что кислотная обработка клиноптилолита приводит к изменению его химического состава, кислотно-основных и каталитических свойств.

Effect of acid modification of natural zeolite Clinoptilolite with 0.125-3.0M HNO₃ on physicochemical and catalytic properties in synthesis of N-formylaniline from aniline and formic acid was investigated. The yield of N-formylaniline was found to rise with the increasing acid concentration that was explained by increasing surface acidity.

N-формиланилин (N-фениламид муравьиной кислоты) широко используется в качестве добавки в резиновых изделиях, а также как синтетическое промежуточное соединение для синтеза более сложных молекул, например, для синтеза фунгицида мепанипирима. Одним из способов его получения является реакция N-формилирования анилина (рис. 1). Среди различных формилирующих агентов муравьиная кислота представляется более перспективным реагентом из-за своей низкой стоимости и возможности ее получения из возобновляемых материалов, полученных из биомассы. Одним из последних достижений в области реакций N-формилирования стала каталитическая реакция с использованием HCOOH и различных катализаторов, таких как оксиды металлов (ZnO, NiO и др.), галогениды металлов (ZnCl₂, AlCl₃, NiCl₂ и др.), неорганические материалы (глины, силикагель, цеолит и др.), ионообменные смолы (Amberlite IR-120) и др.

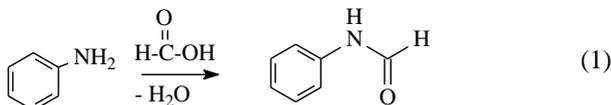


Рис. 1 – Схема реакции N-формилирования анилина муравьиной кислотой

В последние годы активно проводятся работы по применению природных глин, модифицированных различными кислотами, поскольку

такой подход позволяет регулировать природу кислотно-основных центров. В данной работе представлены результаты исследования влияния активации природного цеолита клиноптилолита 0.125-3.0 М азотной кислотой на выход N-формиланилина в реакции N-формилирования анилина муравьиной кислотой.

В работе был использован природный клиноптилолит (цеолитсодержащий трепел Хотынецкого месторождения Орловской области). Фазовый состав: 42 масс.% - клиноптилолит $((\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_{0.3} \text{Al}_3 (\text{Al}, \text{Si})_2 \text{Si}_{13} \text{O}_{36} \cdot n\text{H}_2\text{O})$, 37 масс.% - кварц и опал (SiO_2), 16 масс.% - монтмориллонит $(\text{Ca}_{0.2} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$, 3 масс.% - мусковит $(\text{KAl}_2 [\text{AlSi}_3 \text{O}_{10}] (\text{OH})_2)$, 2 масс.% - калиевый полевой шпат $(\text{KAlSi}_3 \text{O}_8)$. Модифицирование клиноптилолита (КП) проводили азотной кислотой с концентрацией 0.125-3.0 М. Согласно полученным данным, обработка клиноптилолита (КП) кислотой HNO_3 приводит к замещению обменных катионов Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} на H^+ на это указывает изменение химического состава КП. Так, данные химического анализа 0.25М КП указывают на снижение содержания Na^+ (с 0.23 до 0.1 масс. %), K^+ (с 1.60 до 0.3 масс. %), Mg^{2+} (с 0.88 до 0.26 масс. %) и Ca^{2+} (с 1.28 до 0.45 масс. %).

Эти изменения коррелируют с изменением поверхностной кислотности образцов ($\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$, точка нулевого заряда) (рис. 2), определенной методом массового титрования Зёренсена-де Брюина [1]. Ранее этот метод был успешно использован для определения точки нулевого заряда ($\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$) для оксидов и углеродов, модифицированных азотной кислотой [1]. Согласно полученным данным точки нулевого заряда ($\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$) клиноптилолита равна 9.2. После обработки азотной кислотой значение $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$ снижается. Резкое изменение значения $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$ указывает на замещения обменных катионов на протоны. Стоит заметить, что обработка КП 1М азотной кислотой приводит к небольшому снижению содержания алюминия с 26.7 до 24.2 масс.%. Это тоже может вносить вклад в образование кислых центров. Хорошо известно [2], что вымывание ионов алюминия из структуры глинистых материалов приводит к появлению кислых Si-(OH)-Al групп.

Каталитические свойства полученных материалов изучены в реакции N-формилирования анилина муравьиной кислотой при 35 °С. Реакцию проводили в стеклянном термостатированном реакторе, снабженном мешалкой и обратным холодильником. Катализаторы перед каждым экспериментом активировались прокаливанием при 150 °С в течение 2 ч для удаления адсорбированной воды. Реакция была изучена в растворе метанола при мольном отношении в растворе НСOON /анилин равном 2 и загрузке катализатора равной 10 масс. % в расчете на анилин. Было

показано, что реакция в присутствии исследуемых материалов имеет гетерогенный характер, поскольку катализатор визуально представлял отдельную фазу и реакция после отделения катализатора не протекала.

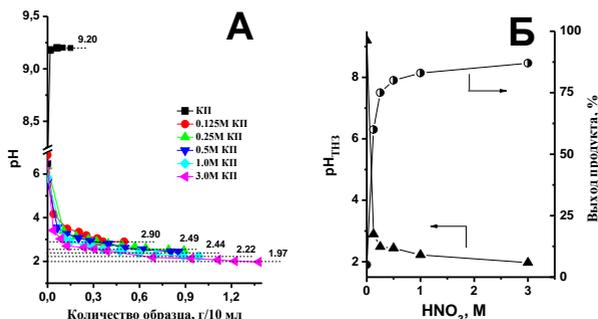


Рис. 2 - (А) Кривые массового титрования клиноптилолита и образцов, полученные после его обработки 0.125-3.0 М HNO₃, (Б) Влияние концентрации азотной кислоты на pH_{TiH3} и выход N-формиланилина.

Основным продуктом реакции был N-формиланилин. В присутствии клиноптилолита его выход не превышал 5% за 90 мин реакции. Однако, его выход возрастал до 60-87% в присутствии клиноптилолита, обработанного азотной кислотой. Повышение концентрации HNO₃ способствовало росту выхода N-формиланилина (рис. 2Б). Максимальный выход 87% был в присутствии клиноптилолита, обработанного 3.0M кислотой. Влияние концентрации кислоты на выход N-формиланилина объясняется изменением поверхностной кислотности образцов (рис. 2)

Литература:

1. Иконникова К.В. Теория и практика рН-метрического определения кислотно-основных свойств поверхности твердых тел: учебное пособие // К.В. Иконникова, Л.Ф. Иконникова, Т.С. Минакова, Ю.С. Саркисов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 85 с.
2. Н. О. Pastore, S. Coluccia, L. Marchese, Porous aluminophosphates: from molecular sieves to designed acid catalysts // Annual Review of Materials Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 351–395

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АНТИПИРЕНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.С. Мурашкина

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск, murashkina02@gmail.com

Одной из проблем во многих отраслях, таких как машиностроение, строительство, авиа- и автомобилестроение и т.д. является снижение воспламеняемости и горючести полимерных материалов. Введение в полимерные материалы различных антипиренов является одним из решений этой проблемы. Однако у замедлителей горения есть ряд недостатков: высокая токсичность продуктов пиролиза и горения, значительная стоимость, обильное дымовыделение и ухудшение эксплуатационных свойств полимерных материалов.

One of the problems in many industries, such as mechanical engineering, construction, aviation and automotive, etc. is the reduction of the Flammability and combustibility of polymer materials. The introduction of various flame retardants into polymer materials is one of the solutions to this problem. However, combustion retarders have a number of disadvantages: high toxicity of pyrolysis and combustion products, significant cost, abundant smoke emission and deterioration of the performance properties of polymer materials.

На сегодняшний день одна из быстро развивающихся отраслей это производство полимерной продукции и полимеров. Упаковочные материалы, строительство, автомобильная промышленность и электроника – основные сферы потребления данной продукции.

В связи с ростом производства и потребления полимерной продукции увеличивается количество пожаров. Для воспламеняемости и горючести полимеров используются различные антипирены – замедлители горения.

В качестве замедлителей горения наиболее часто используются галогенсодержащие антипирены –хлор- и бром содержащие соединения, т.к. они обеспечивают наиболее лучшее соотношение цены и качества. В сравнении с бромсодержащими антипиренами, хлорсодержащие менее стабильны, имеют меньшую эффективность и могут вызывать коррозию, их продукты горения более летучи [1-3].

Однако у галогенсодержащих антипиренов есть свои недостатки: увеличение количества дыма и выделение коррозионноактивных газов (HBr) в процессе горения. Замедление процесса горения происходит из-за образования HBr, что в свою очередь приводит к образованию частично сгоревших продуктов разложения полимера, а также образованию угарного газа (CO). Кроме того, когда реакция с

антипиреном заканчивается, оставшаяся часть полимера подвергается воздействию повышенной температуры, поэтому галогенсодержащие антипирены не очень качественно выполняют свои функции при высоких значениях теплового потока, если только в полимере не содержится высокая концентрация антипирена. Еще один недостаток данного вида антипиренов заключается в отсутствие химической связи между полимером и ингибитором. В связи с этим ингибитор может с течением времени попасть в окружающую среду.

Также в качестве замедлителей горения широко используются фосфорсодержащие антипирены. Они имеют уникальное свойство – являются ингибиторами пламени в паровой или конденсированной фазах в зависимости от их химической структуры и взаимодействия с полимером в условиях пожара. Эти хорошо работают в условиях пожаротушения с высоким тепловым потоком, а также могут обеспечить превосходную противопожарную защиту в сочетании с другими антипиренами.

Впрочем, данный вид антипиренов применяется менее широко, чем галогенсодержащие антипирены. Одной из причин этого является то, что без дополнительных добавок они могут не оказывать пламегасящего эффекта, как например, в стирольных или полиолефиновых полимерах. К тому же, во время пожаров антипирены образуют большее количество дыма и угарного газа, т.к. замедляют горение полимера [4].

Также применяются гидроксид алюминия и гидроксид магния. Они имеют стоимость ниже, чем фосфорсодержащие и галогенсодержащие антипирены. Но в связи с тем, что добавки неорганических гидроксидов могут достигать 70%, то основным их недостатком являются технологические трудности и снижение механических характеристик полимерных материалов,

В процессе горения минеральные антипирены подвергаются эндотермической реакции разложения, сопровождающейся снижением температуры и образованием воды, пары которой затем горючие газы и защищают поверхность полимерного материала от влияния кислорода, т.е. образовавшиеся оксиды действуют как экранирующий слой [12-13].

Использование минеральных антипиренов началось с 1920-х годов, хотя по некоторым данным известно, что они применялись еще в XVII веке. Это проверенная временем и экологически чистая технология. В условиях пожара антипирены снижают уровень дыма и выбросы токсичных газов. Они имеют невысокую стоимость и для удобства использования могут быть покрыты поверхностно-активными веществами.

Однако можно выделить два основных недостатка минеральных антипиренов. Первый недостаток – ограниченное время действия антипирена, т.е. после завершения эндотермической реакции разложения и образования водяных паров, оставшийся оксид металла не обеспечивает дополнительной защиты полимера. Таким образом, минеральные антипирены задерживают воспламенение и замедляют начальную стадию развития пожара. Но они не смогут остановить пожар, если постоянно будет производиться нагрев извне.

Еще одним недостатком является то, что с увеличением концентрации минеральных антипиренов в полимерных материалах, повышается эффективность препятствовать возгоранию, но вместе с тем снижаются механические свойства полимеров. Поэтому антипирены не могут использоваться для всех видов полимерных материалов [5-7].

Благодаря экологической безопасности и кристаллической структуре минеральных антипиренов, на сегодняшний день они являются перспективными замедлителями горения. Среди них можно выделить природный минерал – цеолит.

Значительная стоимость, ухудшение эксплуатационных свойств полимерных материалов, обильное дымовыделение, высокая токсичность продуктов пиролиза и горения и т.д. – это недостатки каждого вида замедлителей горения, поэтому нельзя достигнуть оптимального сочетания параметров.

Добавление экологически безопасных цеолитов в полимерные композиты может стать решением этой проблемы. Цеолиты безопасны для человека и окружающей среды, имеют низкую стоимость, при пиролизе и горении не выделяют токсичных веществ, используются в разных сферах деятельности человека (медицине, сельском хозяйстве и т.д.).

Литература:

1. Воробьев В.А., Андрианов Р.А., Ушаков В.А. Горючесть полимерных строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1978. – 224 с.
2. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. – М.: Химия, 1980. – 274 с.
3. Исаева Л.К. Пожары и окружающая среда. – Москва: Изд. Дом «Калан», 2001. – 222 с.
4. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Снижение горючести полимерных материалов. – М.: Знание, 1981. – 64 с.
5. Брык М.Т. Деструкция наполненных полимеров. М.: Химия, 1989, 192 с.

6. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия. 1980. 224 с.

7. Мурашкина Ю. С., Назаренко О. Б. Снижение пожарной опасности эпоксидных композитов за счет применения природных цеолитов // Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития: сборник научных трудов международной научной конференции, г. Томск, 12–16 ноября 2018 г.—Томск, 2018. – 2018. – С. 313-314.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРОКАЛИВАНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ И КАТАЛИТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ Ni-ПОЛИМЕРНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

Д.В. Нефедова^{1,2}, А.М. Фиоре², В. Петрелли², Д.В. Толстухина¹

**¹Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия**

**²Политехнический университет Бари, г. Бари, Италия
nefedova.darya@gmail.com**

Реакция восстановления нитробензола является одной из важных в современной химической промышленности. Для протекания данной реакции необходим эффективный и селективный катализатор, в качестве которого предлагается использовать Ni катализатор на полимерной основе. В данной работе рассматривается влияние методики прокаливания Ni катализатора на полимерной основе на его морфологические свойства и каталитическую активность в реакции восстановления нитробензола.

The reaction of nitrobenzene reduction is one of the most important in the modern chemical industry. For this reaction to proceed, an effective and selective catalyst is required, which is proposed to be a polymer-based Ni catalyst. In this work, the effect of the method of calcining Ni polymer-based catalyst on morphological properties and catalytic activity in the reduction of nitrobenzene is considered.

Поиск эффективного и недорогого катализатора для процесса восстановления нитробензола в настоящее время является актуальной задачей. В промышленности для данной реакции в качестве катализаторов используются Pd и Pt-Pd частицы, нанесенные на углерод или неорганические оксиды. Однако, ввиду высокой стоимости благородных металлов катализаторов данный процесс является очень затратным. Для снижения экономических затрат возможно использование в качестве катализатора более дешевых переходных металлов, в частности Ni, который в последнее время благодаря своей низкой стоимости используются во многих органических реакциях (в основном, гидрирования) [1].

Способ синтеза катализатора на полимерной основе основан на предварительном приготовлении металлосодержащего мономера с последующей его сополимеризацией с подходящими сомономерами с целью получения нерастворимого материала, содержащего хорошо диспергированное распределение металлических центров [2].

Методом преобразования нанесенных комплексов в стабилизированные нерастворимой матрицей металлические частицы является прокаливание, которое обычно проводят в инертной атмосфере или в восстановительных условиях. Температура прокаливания выбирается в зависимости от природы носителя и металлического катализатора. Широко признано, что морфология полученных наночастиц сильно влияет на активность и селективность конечного катализатора [3].

Синтез катализатора происходил в три этапа: синтез мономера, синтез полимера на его основе и прокаливание полимера в присутствии водорода при высоком давлении и температуре.

Синтез мономера производился путем добавления НААЕМА (2-(ацетоацетокси)этилметакрилат) и спиртовому раствору нитрата никеля $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$. Полученный мономер растворяли в DMF (N,N-диметилформамид), и поэтапно добавляли DMAA (N,N-диметилакриламид) в качестве , MBAA (N,N-метиленбисакриламид) в качестве и AIBN (азобисизо-бутиронитрил) в качестве связующего компонента, после чего смесь интенсивно перемешивалась при температуре 110°C в течении часа. Восстановленный зеленый гель промывали ацетоном и оставляли в колбе под вакуумом при 110 °C на один час для удаления DMF В результате был получен зеленый гель, который промывался ацетоном и сушился в течении 12 часов в сушильном шкафу.

Методика прокаливания катализатора варьировалась: в первом случае Ni(AAEMA) помещали в автоклав из нержавеющей стали объемом 25 мл при начальном давлении водорода 5 бар, постепенно нагревали со скоростью 10 °C в минуту и выдерживали при температуре 300 °C в течении 30 мин. После этого нагрев отключали и всю систему оставляли закрытой в течение ночи, пока она не достигла комнатной температуры, в результате чего получился черный порошок Ni-res1.

Во втором случае прокаливание проводилось в аналогичных условиях в течении 30 минут, однако после отключения нагрева клапан автоклава был открыт, пропуская внутрь системы воздух. После охлаждения до комнатной температуры был также получен черный порошок, названный Ni-res2.

Реакцию восстановления нитробензола проводили в атмосфере азота в присутствии борогидрида натрия NaBH_4 в качестве восстановителя и метанола CH_3OH в качестве растворителя при комнатной температуре. Исследование реакционной смеси проводили методом газожидкостной хроматографии. Конверсии и выходы рассчитывали с помощью ГЖХ-анализа с использованием бифенила в качестве внутреннего стандарта.

В таблица 1 показано, что Ni-res1 был активен в отношении восстановления нитробензола и селективен в отношении образования анилина. Конверсия субстрата составляла 99% через 3 часа, и основным продуктом является анилин (III, опыт 1).

Таблица 1 – Каталитическая активность

№	Катализатор	Время, ч	Конверсия, %	Селективность, %		
				I	II	III
1	Ni-res1	3	>99	24	1	75
2	Ni-res2	3	33	>99	-	-
3	Ni-res2	6	64	>99	-	-
4	Ni-res2	9	82	96	4	-

Активность и селективность Ni-res1 напоминают уже наблюдаемые для аналогичного никелевого катализатора на носителе из акриламидного полимера (Ni-pol) [4]. Анализ FESEM показал, что в Ni-pol каталитически активными частицами были наночастицы Ni, нанесенные на нерастворимую матрицу, с диаметром в диапазоне от 11 до 37 нм.

Реакция, катализируемая образцом Ni-res2 (эксперимент 2 – 4), напротив, протекала медленнее, чем реакция, указанная в эксперименте 1. Потребовалось 9 часов для достижения 82% конверсии (эксперимент 4), а селективность всегда была направлена на азоксibenзол (I).

Принимая во внимание, что предложенный механизм восстановления нитроаренов может быть прямым или косвенным (рис. 1), наличие азо- и азоксисоединений (таблица 1) в реакционной смеси, катализируемой Ni-res1 или Ni-res2, с большой долей вероятности предполагает что описанные здесь никелевые катализаторы следуют по пути конденсации.

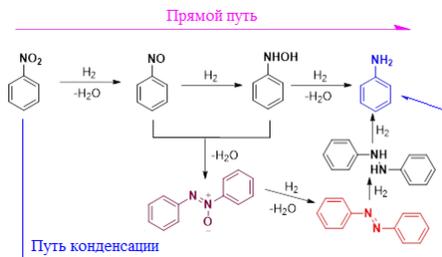


Рис. 1 – Механизм реакции восстановления нитробензола [5]

Однако результаты, представленные в таблице 1, показывают, что Ni-res1 может почти полностью превратить субстрат в конечный продукт (анилин), в то время как Ni-res2 менее активен, хотя всегда селективен по отношению к азоксибензолу.

Чтобы получить представление о неожиданной каталитической активности, Ni-res2 был подвергнут анализу FESEM в режиме STEM. Снимки FESEM (рис. 1) показывают, что образующиеся частицы Ni равномерно распределяются по полимерной матрице и встраиваются в нее. Размер наночастиц Ni составляет от 75 до 400 нм в, причем большинство из них имеют размер от 150 до 250 нм. Самое интересное в их очень необычной морфологии это «еже-подобная» форма частиц. Все эти морфологические особенности отвечают за их неожиданную каталитическую активность и селективность.

Таким образом, процедура прокаливания одного и того же комплекса Ni на полимерной основе приводит к получению различных материалов в зависимости от того, как проходит стадия охлаждения (в атмосфере водорода или на воздухе). Интересно, что, если фаза охлаждения происходит на воздухе, полученный материал содержит необычные «еже-подобные» частицы Ni, активность и селективность которых при катализе восстановления нитробензола отличаются от тех, которые демонстрирует катализатор, полученный охлаждением в присутствии водорода.

Благодарности: Авторы выражают благодарность профессору М.М. Делл’Анна и профессору В.В. Ларичкину за руководство работой. Работа выполнена в рамках проекта Erasmus+ KA107.

Литература:

1. Romanazzi G. et al Polymer supported Nickel nanoparticles as recyclable catalyst for the reduction of nitroarenes to anilines in aqueous medium // Molecular Catalysis. – 2018. – Т. 446. – С. 31.

2. Dell'Anna M.M., Romanazzi G., Mastroilli P. Polymer Supported Catalysts Obtained from Metal-Containing Monomers // Current Organic Chemistry. – 2013. – Т. 17. – С. 1236.

3. Zhang X., Yao J., Ke X. Tuning Catalytic Selectivity in Cascade Reactions by Light Irradiation // Catalysis Letters. – 2018. – Т.148. – С. 1124.

4. Fiore A.M., Romanazzi G., Dell'Anna M.M. et al. Mild and efficient synthesis of secondary aromatic amines by one-pot stepwise reductive amination of arylaldehydes with nitroarenes promoted by reusable nickel nanoparticles // Molecular Catalysis. – 2019. – Т.476.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В ВОДЕ

А.П. Онипченко, Д.А. Немущенко, В.В. Ларичкин
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, na.oni@yandex.ru

Изучены суспензии наночастиц диоксида кремния в воде. Для равномерного распределения наночастиц использовался метод УЗ диспергирования. Результативность распределения наночастиц в суспензии контролировалась турбидиметрическим методом, а размеры твердых частиц определялись с помощью измерения оптической плотности. Показана эффективность применения УЗ-метода. Результаты исследования могут быть использованы в технологиях изготовления керамики при модификации материалов наночастицами различной химической природы.

Suspensions of silicon dioxide nanoparticles in water have been studied. For uniform distribution of nanoparticles, the method of ultrasonic dispersion was used. The efficiency of the distribution of nanoparticles in the suspension was monitored by the turbidimetric method, and the sizes of solid particles were determined by measuring the optical density. The effectiveness of the method is shown. The results of the study can be used in technologies for the manufacture of ceramics by modifying materials with nanoparticles of various chemical nature.

Введение

Одной из задач строительной индустрии является создание новых материалов с улучшенными свойствами материалов. Вариантом решения этой задачи является задействование отходов в повторном использовании в промышленности, что не только уменьшает себестоимость материалов, но и позволяет существенно снизить загрязнение окружающей среды.

Для повышения эксплуатационных свойств получаемых строительных материалов предлагается вводить в качестве

функциональной добавки нано-SiO₂ [1]. Такая добавка увеличивает долговечность и прочность бетона при сжатии [2, 3] и растяжении [4, 5], снижает водопоглощение [5], увеличивает сопротивление просачиванию воды и способствует контролю вымывания кальция.

Методика экспериментального исследования

Водные суспензии готовились поэтапно растворением ПАВ в воде с последующим добавлением нанодобавки в концентрации 0,5 масс. %, после чего суспензия обрабатывалась в УЗ-ванне. В экспериментах варьировалась концентрация ПАВ, время обработки в УЗ-поле, а также контролировалась температура суспензии. Суспензии анализировались турбидиметрическим методом сразу и через 24 ч. Используя следствия из закона Бугера-Ламберта-Бера для турбидиметрии, на основе спектрофотометрических данных оценивались размеры твердых частиц суспензии.

Затем формовались образцы керамики в форме таблеток. При этом матричным материалом являлся химически чистый карбонат кальция (CaCO₃). Таблетки формовались по технологии полусухого прессования.

Высушенные образцы покрывались слоем проводящего материала (медь), поверхность образцов анализировалась на электронном микроскопе Zeiss EVO 50 XVP с насадкой для определения химического состава присутствующих включений. При проведении микроскопии выделялись частицы SiO₂ в матричном материале и оценивался их средний размер.

Результаты и их обсуждение

При увеличении концентрации ПАВ в суспензии (рис. 1) наблюдается увеличение мутности, максимум фиксируется при содержании ПАВ 1 масс. %, дальнейшее увеличение количества ПАВ не дает положительного результата. Следует отметить рост мутности суспензии даже без УЗ-обработки. Мутность возрастает скачкообразно, через 24 ч следует незначительное уменьшение. ПАВ не оказывает положительного влияния на стабильность, это можно отметить из 1 столбца диаграммы. При концентрации ПАВ 0,5–1 масс. %, мутность суспензии при УЗ-воздействии возрастает более чем в 2 раза.

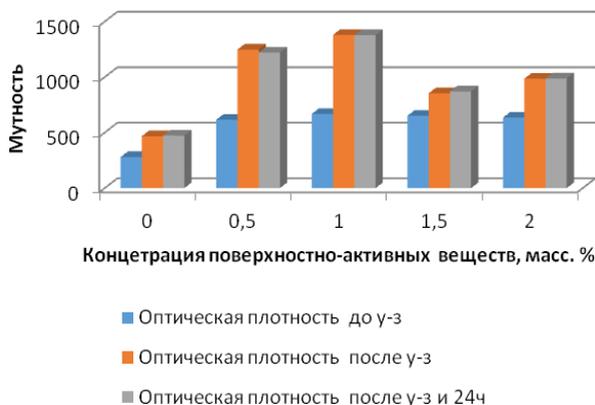


Рис. 1 - Мутность дисперсии SiO_2 в воде в присутствии ПАВ

Как видно на рисунке 2, влияние времени УЗ-обработки суспензии на мутность и эффективность распределения наночастиц незначительное. При этом стабильность суспензии при более продолжительном воздействии возрастает. Дальнейшее увеличение времени обработки приводит к значительному разогреву суспензии, что может привести к изменению свойств ПАВ и другим нежелательным процессам.

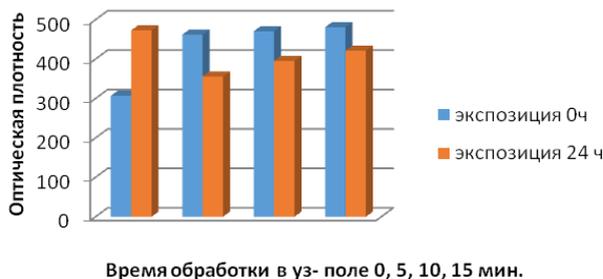


Рис. 2 – Мутность водных суспензии SiO_2 при различном времени обработки в УЗ-поле

На изображении с электронного микроскопа видно, что частицы диоксида кремния присутствуют в образце, полученном с помощью УЗ-воздействия, в виде конгломератов размером порядка 40 мкм. В образце, полученном распределением частиц в керамической массе с использованием лопастной мешалки, конгломераты наночастиц имеют размеры порядка 200 мкм. На обзорных микрофотографиях с

определением химического состава (увеличение 300–400 крат) можно наблюдать значительно более равномерное распределение конгломератов частиц в матричном материале при использовании ультразвукового метода.

Литература:

1. Пат. 2067077 РФ, МПК6 C01B 33/88. Способ получения ультрадисперсной двуокиси кремния, устройство для его осуществления и ультрадисперсная двуокись кремния / Лукашов В.П., Бардаханов С.П., Салимов Р.А., Корчагин А.И., Фадеев С.Н., Лаврухин А.В.; заяв.: Лукашов В.П., Бардаханов С.П., Салимов Р.А., Корчагин А.И., Фадеев С.Н., Лаврухин А.В.; патентообл. Бардаханов С.П. Заявл. № 94002568/26; заявл. 26.01.94; опубл. 27.09.96. 6 с.

2. Niewiadomski P., Hoła J., Ćwirzeń A. Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. Issue 3. Pp. 877–886. DOI: 10.1016/j.acme.2018.01.006 14. Dolatabad Y.A., Kamgar R., Nezaд I.G. Rheological and Mechanical Properties, Acid Resistance and Water Penetrability of Lightweight Self-Compacting Concrete Containing Nano-SiO₂, Nano-TiO₂ and NanoAl₂O₃// Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2019. DOI: 10.1007/s40996-019-00328-1

3. Niewiadomski P., Hoła J., Ćwirzeń A. Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. Issue 3. Pp. 877–886. DOI: 10.1016/j.acme.2018.01.006

4. Dolatabad Y.A., Kamgar R., Nezaд I.G. Rheological and Mechanical Properties, Acid Resistance and Water Penetrability of Lightweight Self-Compacting Concrete Containing Nano-SiO₂, Nano-TiO₂ and NanoAl₂O₃ // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2019. DOI: 10.1007/s40996-019-00328-1

5. Faez A., Sayari A., Manie S. Mechanical and Rheological Properties of Self-Compacting Concrete Containing Al₂O₃ Nanoparticles and Silica Fume // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2020. DOI: 10.1007/s40996-019- 00339-y

СИНТЕЗ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ В РЕАКЦИИ ГИДРИРОВАНИЯ НИТРОБЕНЗОЛА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНИЛИНА В УСТОЙЧИВЫХ УСЛОВИЯХ

Д.В. Толстихина, Д.В. Нефедова, В. Петрелли
Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия, daradasha@mail.ru

В области каталитической химии важной задачей является оптимизация условий процесса, связанная с пополнением запасов катализаторов. Одним из возможных способов оптимизации является замена обычно используемых, но дорогих благородных металлов (палладия (Pd) и платины (Pt)) на недорогие, но не менее эффективные кобальт (Co) и никель (Ni) [1].

В данной работе описан синтез каталитических систем на основе кобальта в атмосфере азота N_2 для проведения процесса гидрирования нитробензола до анилина при комнатной температуре в присутствии борогидрида натрия $NaBH_4$.

An important task in the catalytic chemistry is optimization of process conditions associated with the replenishment of catalysts. One of the possible optimization methods is to replace commonly used but expensive noble metals (palladium (Pd) and platinum (Pt)) with inexpensive but no less effective cobalt (Co) and nickel (Ni) [1].

This work describes the synthesis of catalytic systems based on cobalt in an N_2 nitrogen atmosphere for the hydrogenation of nitrobenzene to anilines at room temperature in the presence of sodium borohydride $NaBH_4$.

Для получения нанесенного металлического комплекса применяется реакция между полимером, который содержит функциональные группы лиганда, и растворимой солью металла (или комплексом). В данной работе мы применяем другой путь получения комплекса - прямая сополимеризация комплексов переходных металлов, содержащих полимеризуемый лиганд [2].

В данной работе мы синтезируем новые полимеризуемые комплексы кобальта (II). Этот комплекс может вести себя как предшественник гибридных катализаторов, потенциально для всех реакций, катализируемых комплексами Р-дикетонато. Лиганд, выбранный для образования металлоорганических мономеров, представлял собой депротонированную форму коммерчески доступного 2-(ацетоацетокси) этилметакрилата I-НААЕМА, который воплощает лигандную функциональность.

Наночастицы Co на полимерном носителе мы получаем при проведении нескольких этапов: синтез мономера, полимеризация, прокаливание в атмосфере H_2 . Полученные наночастицы мы используем

для гидрирования нитроаренов (в данной работе выбран нитробензол) до анилинов при комнатной температуре в присутствии NaBH_4 . Через 4 часа в ходе реакции с высоким выходом образуется анилин. Катализатор демонстрирует отличную селективность и рециркуляцию в течение не менее 5 циклов, что указывает на экологичность и экономичность реакции, а, следовательно, и на улучшенную оптимизацию процесса.

Основные продукты реакции – это амины, в частности анилин и его производные, которые представляют огромную долю рынка в органической химической промышленности. 1,2-анилин был впервые выделен как продукт сухой перегонки индиго. Пятнадцать лет спустя российский химик Зинин Н.Н. впервые получил анилин путем восстановления нитробензола с использованием сульфидов натрия в качестве стехиометрических восстановителей [3].

Механизм получения анилина из нитробензола может осуществляться двумя путями. В первом (прямой) путь) нитросоединение восстанавливают до соответствующего нитрозо-, арил/алкилгидроксиламина с последующим образованием анилина. Во втором (конденсация) нитрозо конденсируется с N-арил/алкилгидроксиламиновыми соединениями с образованием соответствующего азокси- промежуточного соединения. В дальнейшем последний превращается в азогидразо- и, наконец, в анилин.

На этапе экспериментальной части предшественник каталитической системы приготовлен путем растворения соли кобальта $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, НААЕМА (2-(ацетоацетокси)этилметакрилат) и гидроксида натрия NaOH в 20 мл воды с последующей фильтрацией. К полученному мономеру $\text{Co}(\text{AAEMA})_2$ для получения полимера по каплям добавляется смесь DMAA (N,N-диметилакриламид), MBAA (N,N-метиленабисакриламид) и DMF (N,N-диметилформамид), затем на масляной бане при 50°C добавляется связующий компонент AIBN (азобисизобутиронитрил). Далее полученная каталитическая система прокаливается в течении 30 минут при 300°C в присутствии водорода.

Получение анилина из нитробензола в присутствии 2 ммоль% кобальтового катализатора проводится при комнатной температуре, в качестве растворителя используется метанол CH_3OH , в качестве восстановителя реакции – борогидрид натрия NaBH_4 .

Для установления содержания кобальта в составе ряда катализаторов был проведен элементный анализ. Содержание кобальта (II), в среднем, составляет около 4%. В ходе исследования установлено, что при увеличении процентного содержания кобальта выход анилина увеличивается.

В заключении, во время исследования был приготовлен ряд катализаторов на основе кобальта (II), которые были протестированы в реакции восстановления нитробензола до анилина. По результатам исследования установлено, что полученный катализатор на основе кобальта проявляет высокую селективность и активность в условиях данной реакции. Так же катализатор способен проявлять активность в течении 5 циклов реакции (выход анилина снижается с каждой последующей реакцией).

Благодарности: профессору Делл'Анна Марие Микеле и профессору Ларичкину В.В.

Литература:

1. Ma H. et al. Highly active layered double hydroxide-derived cobalt nano-catalysts for p-nitrophenol reduction //Applied Catalysis B: Environmental. – 2016. – Т. 180. – С. 471-479.
2. Mastrorilli P., Nobile C. F., Marchese G. Cobalt (II) and iron (III) complexes with 2-(acetoacetoxy) ethylmethacrylate: potential precursors of hybrid catalysts //Inorganica chimica acta. – 1995. – Т. 233. – №. 1-2. – С. 65-69.
3. Formenti D. et al. Reduction of Nitro Compounds Using 3d-Non-Noble Metal Catalysts //Chemical reviews. – 2018

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМПЛЕКСНОЙ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ОТ ОКСИДОВ АЗОТА НА ОСНОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Шеболтасов А. Г.^{1,2}, Верниковская Н. В.^{1,2}, Чумаченко В. А.¹

¹Институт катализа СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, artemsheb@mail.ru

Работа посвящена математическому моделированию процесса комплексной очистки отходящих газов производства азотной кислоты от оксидов азота (NO_x и N_2O) в двухслойном адиабатическом реакторе. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования, полученных по моделям с различной степенью детализации. Найдены оптимальные значения параметров, которые в типичных для агрегатов азотной кислоты УКЛ-7 условиях обеспечивают комплексную очистку от оксидов азота не менее 98 %.

The present work is devoted to mathematical modeling of the integrated catalytic purification of tail gases in nitric acid plants from nitrogen oxides (NO_x and N₂O) in two consecutive adiabatic catalyst beds. For typical gas flow rates in UKL-7 nitric acid plant, the optimal values of catalyst loading were found, which provide at least 98 % waste gas purification from nitrogen oxides. Comparison of simulation results obtained using models with different levels of detail is carried out.

1. Введение

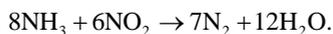
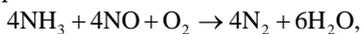
Оксиды азота (NO_x, N₂O) – это высокотоксичные химические вещества. Одним из крупнейших стационарных источников эмиссии как NO_x, так и N₂O являются установки по производству азотной кислоты.

В агрегатах по получению азотной кислоты удаление токсичных примесей оксидов азота из отходящих газов осуществляется в реакторах каталитической очистки [1]. Эффективная работа реакторного узла требует разработки конструкций аппаратов и определения оптимальных технологических режимов ведения процесса. Для этих целей используются методы гидродинамического и математического моделирования, которые дают возможность изучать процесс с помощью моделей, сохраняющих наиболее существенные физические и химические свойства реального объекта.

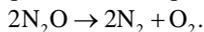
Целью данной работы является сравнительный анализ результатов, полученных по моделям, характеризующимся различной степенью детализации описания процесса комплексной очистки отходящих газов производства неконцентрированной азотной кислоты от оксидов азота (NO_x и N₂O) в двух последовательно расположенных адиабатических слоях катализатора.

2. Математическая модель

Каталитическая очистка от NO_x и N₂O заключается в их превращении в молекулярный азот и воду, что достигается различными путями. При селективном восстановлении оксидов азота аммиаком (СКВ) протекают следующие основные реакции:



Разложение закиси азота происходит по реакции:



Очистка от оксидов азота производится в 2-слойном адиабатическом реакторе. В первом слое происходит СКВ NO_x аммиаком до азота, во втором – каталитическое разложение N₂O на азот и кислород.

Экспериментально установлено, что скорости реакций селективного каталитического восстановления NO_x аммиаком на V/Al катализаторе и

разложения N₂O на оксидном Ni/Co катализаторе описываются уравнениями 1-го порядка [2,3].

Для описания каталитических процессов комплексной очистки от оксидов азота, протекающих в 2-слойном реакторе, применена следующая математическая модель:

<p>Двухфазная диффузионная модель (полная)</p> $-u_0 \frac{\partial y_k^g}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P}{T_g} \cdot \frac{T_0}{P_0} \cdot D_k^e \frac{\partial y_k^g}{\partial z} \right) + S_{y_0} \cdot \beta_k \cdot \frac{P}{T_g} \cdot \frac{T_0}{P_0} \cdot (y_k^s - y_k^g) = 0$ $-S_{y_0} \cdot \beta_k \cdot \frac{P}{T_g} \cdot \frac{T_0}{P_0} \cdot (y_k^s - y_k^g) + v_k \cdot k \cdot y_{NO_x(N_2O)}^s = 0$ $c_p(T_{on}) \frac{u_0}{V_{m0}} \frac{\partial T_g}{\partial z} = S_{y_0} \cdot \alpha \cdot (T_s - T_g)$ $-\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = -S_{y_0} \cdot \alpha \cdot (T_s - T_g) + (-\Delta H) \cdot k \cdot \frac{P_0}{R \cdot T_0} \cdot y_{NO_x(N_2O)}^s$	<p>Граничные условия:</p> $z = 0: T_g = T_g^{ex},$ $D_k^e \frac{y_k^g}{\partial z} = u_0 (y_k^{g,ex} - y_k^g), \frac{\partial T_s}{\partial z} = 0;$ $z = L: \frac{\partial T_s}{\partial z} = 0, \frac{\partial y_k^g}{\partial z} = 0.$
--	---

В этой модели учитываются: межфазный тепло- и массообмен, конвективный перенос массы и тепла в газовой фазе, диффузионный перенос массы по длине слоя в газовой фазе, перенос тепла по длине слоя в твердой фазе, наблюдаемые скорости реакций превращения NO_x и разложения N₂O, выделение тепла в результате протекания экзотермических реакций.

Рассматривались также двухфазная и однофазная модели идеального вытеснения, которые могут использоваться для описания процесса.

<p>Двухфазная модель идеального вытеснения (ИВ)</p> $-u_0 \frac{\partial y_k^g}{\partial z} + S_{y_0} \cdot \beta_k \cdot \frac{P}{T_g} \cdot \frac{T_0}{P_0} \cdot (y_k^s - y_k^g) = 0$ $-S_{y_0} \cdot \beta_k \cdot \frac{P}{T_g} \cdot \frac{T_0}{P_0} \cdot (y_k^s - y_k^g) + v_k \cdot k \cdot y_{NO_x(N_2O)}^s = 0$ $c_p(T_{on}) \frac{u_0}{V_{m0}} \frac{\partial T_g}{\partial z} = S_{y_0} \cdot \alpha \cdot (T_s - T_g)$ $S_{y_0} \cdot \alpha \cdot (T_s - T_g) = (-\Delta H) \cdot k \cdot \frac{P_0}{R \cdot T_0} \cdot y_{NO_x(N_2O)}^s$	<p>Однофазная модель идеального вытеснения (ИВ₁)</p> $-u_0 \frac{\partial y_k^g}{\partial z} + v_k \cdot k \cdot y_{NO_x(N_2O)}^s = 0$ $c_p(T_{on}) \frac{u_0}{V_{m0}} \frac{\partial T_g}{\partial z} = (-\Delta H) \cdot k \cdot \frac{P_0}{R \cdot T_0} \cdot y_{NO_x(N_2O)}^s$
$z = 0: T_g = T_g^{ex}, z = 0: y_k^g = y_k^{g,ex}$	$z = 0: T_g = T_g^{ex}, z = 0: y_k^g = y_k^{g,ex}$

Здесь u_0 – линейная скорость при н. у., м/с; $y_k^{g,s}$ – концентрация веществ в газовой и твердой фазах, мол. доля; $T_{g,s}$ – температура в газовой и твердой фазах, К; P – рабочее давление процесса, атм; D_k^e – эффективный аксиальный коэффициент диффузии k -го вещества, м²/с; S_{y_0} – удельная поверхность зерен в единице объема слоя, м⁻¹; β_k – коэффициент массообмена между газовой и твердой фазами, м/с; v_k – стехиометрические коэффициенты k -го вещества в реакции; $y_{NO_x(N_2O)}^s$ – концентрация ключевого компонента в твердой фазе, мол. доля; V_{m0} –

объем одного моля газа, $c_p(T_{оп})$ – молярная теплоемкость смеси при опорной температуре, Дж/(моль·К); α – коэффициент теплообмена между газовой и твердой фазой, Вт/(м²·К); $\lambda_{эф}$ – эффективный аксиальный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $-\Delta H$ – энтальпия реакции, Дж/моль.

Расчеты процесса проводились при следующих параметрах: входная температура 250 °С; концентрации: оксиды азота – 0.15 об. %, аммиак – 0,165 об. %, кислород – 5 об. %, вода – 2 об. %, воздух – по балансу; объемный расход газа в реактор – 46 040 и 58 670 м³/ч (н. у.).

3. Результаты и обсуждение

Расчеты показали, что при заданной фиксированной конверсии оксидов азота не менее 98 %, использование моделей различной степени детализации приводит к различным величинам высоты слоев и, как следствие, к разным загрузкам катализаторов (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты исследования

$Q = 46\,040\text{ м}^3/\text{ч}$

Модель	Полная		ИВ		ИВ ₁	
	1-й слой	2-й слой	1-й слой	2-й слой	1-й слой	2-й слой
$H, \text{ м}$	0,42	0,45	0,41	0,44	0,35	0,40
$G, \text{ т}$	4,3	4,9	4,2	4,5	3,6	4,1
$X, \%$	98,04	98,15	98,06	98,12	98,02	98,17

$Q = 58\,670\text{ м}^3/\text{ч}$

Модель	Полная		ИВ		ИВ ₁	
	1-й слой	2-й слой	1-й слой	2-й слой	1-й слой	2-й слой
$H, \text{ м}$	0,52	0,56	0,51	0,55	0,45	0,50
$G, \text{ т}$	5,3	5,7	5,2	5,6	4,6	5,1
$X, \%$	98,02	98,12	98,03	98,08	98,09	98,03

Полученные по двухфазной полной модели и модели ИВ высоты слоев отличаются на 0,01 м, а загрузки – на 0,1–0,4 т. Большая разница в значениях искомым величин наблюдается при использовании модели ИВ₁ по сравнению с двухфазной. Высоты слоёв (загрузки) катализатора в этом случае меньше, чем в случае полной модели и модели ИВ на 0,06 и 0,04 м (0,4 и 0,8 т), соответственно. Данные отличия обусловлены тем, что более простые модели не учитывают все существенно важные факторы. Для определения параметров промышленных установок вместо полной модели можно применять модель ИВ, но при этом массу катализатора необходимо брать с некоторым запасом, для компенсации недостаточной полной конверсии. Модель ИВ₁ можно использовать для быстрого расчета загрузок, однако при этом необходимо коррелировать полученные величины с расчетами по более полным моделям.

4. Выводы

Показано, что использование моделей с разной степенью детализации приводит к различиям в расчетных величинах технологических параметров процесса при заданной степени очистки отходящих газов от оксидов азота не менее 98%. Полученные результаты могут быть использованы для оценки оптимальной загрузки катализатора при определении режимов работы реактора каталитической очистки.

Литература:

1. Технологии комплексной низкотемпературной каталитической очистки промышленных газовых выбросов от NO_x и N_2O в производстве азотной кислоты / В. А. Чумаченко, Л. А. Исупова, Ю. А. Иванова [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – № 4. – С. 2–7.
2. Обезвреживание нитрозных газов в производстве адипиновой кислоты: технология двухстадийной каталитической очистки / Е. В. Овчинникова, В. А. Чумаченко, Л. В. Пирютко, А. С. Харитонов, А. С. Носков // Катализ в промышленности. – 2009. – №1. – С. 7.
3. One-reactor scheme for NO and N_2O low-temperature abatement from tail gas in nitric acid production / Yu. A. Ivanova, D. A. Ivanov, V. A. Chumachenko, L. S. Isupova, A. S. Noskov // Abstracts XXII International Conference on Chemical Reactors (CHEMREACTOR-22), London. – 2016. – PP-33. – P. 242–243.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ СПОСОБА ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ВОД, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕМ

Л.А. Яковлева, В.Ю. Александров
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, YakovlevaLA57@yandex.ru

Представлены доводы актуальности разработки метода очистки вод, загрязненных этиленгликолем, которые образуются при эксплуатации воздушных судов. Приведены аргументы в пользу метода озонирования.

The arguments for the relevance of the development of a method for purifying waters contaminated with ethylene glycol, which are formed during the operation of aircraft, are presented. Arguments in favor of the ozonation method are presented.

Этиленгликоль ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$, 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].

Опасность этиленгликоля для водных объектов различных категорий водопользования характеризуют величины ПДК:

- водоемы хозяйственно-питьевого назначения – 1,0 мг/л [3];
- водоемы рыбо-хозяйственного назначения – 0,25 мг/л [4].

Этиленгликоль находит широкое применение в различных технических и производственных процессах. Авторы выделяют его применение в авиации в качестве противообледенительной жидкости (ЛОЖ). Основными средствами, используемыми в мировой практике для защиты воздушных судов от наземного обледенения, являются противообледенительные жидкости (ЛОЖ), содержащие этиленгликоль, 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].

Учитывая, представленные выше, экологически опасные показатели этиленгликоля, 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.

С учетом химических свойств гликолей и экологических требований к обезвреживанию загрязненных ими вод, можно остановить выбор способа обезвреживания на глубоком окислении этиленгликоля 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 рН=7.

В интересах защиты вод и земель от загрязнения этиленгликолем, применяемом в противообледенительной 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 Тезисы конференции Наука, Производство, Оборона, НГТУ-НЭТИ, 2020, Александров В. Ю., Гуровский В.В. «Оценка эффективности очистки вод, загрязненный анилином методом озонирования».

СОДЕРЖАНИЕ

Секция ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

Белоусов И.С.	Новосибирск	3
Булатов С.Д.	Новосибирск	5
Бурма А.А., Маслов Н.А.	Новосибирск	6
Доровских Н.Я., Гоцелюк Т.Б.	Новосибирск	10
Зыбарев И.А.	Новосибирск	14
Кравцов С.Р., Родионов А.И.	Новосибирск	16
Кузнецов Д.А.	Новосибирск	18
Лакиза П.А., Красноруцкий Д.А., Бернс В.А., Жуков Е.П.	Новосибирск	23
Ле Вьет Туан	Новосибирск	27
Мосиенко Д.С., Леган М.А.	Новосибирск	29
Немеров В.В.	Новосибирск	31
Саклаков А.А., Маслов Н.А.	Новосибирск	34
Шелевая Д.Р., Красноруцкий Д.А.	Новосибирск	39
Щеголихин А.М., Маслов Н.А.	Новосибирск	43

Секция АЭРОДИНАМИКИ И АЭРОУПРОГОСТЬ

Акимов М.А.	Новосибирск	48
Быков А.В., Павленко А.М., Занин Б.Ю.	Новосибирск	51
Кашковский А.В., Королёв А.А.	Новосибирск	54
Куликов В.В.	Новосибирск	56
Полевщиков Д.П., Кашковский А.В.	Новосибирск	61
Середа М.С., Червакова А.В., Костюшин К.В.	Томск	64
Сыроватень А.А.	Новосибирск	69
Червакова А.В., Середа М.С., Костюшин К.В.	Томск	73

**Секция ТЕЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Алигасанова К.Л., Бургомистренко Р.Ю.	Томск	78
Белова О.С., Костиков А.И., Шкилькова М.А.	Москва	82
Беляев Е.А., Зрелов В.А.	Самара	86
Беляева Е.В., Гагаркина Е.С., Хромова И.В.	Новосибирск	88
Коротаяева В.А., Тоескин В.А., Чичиндаев А.В.	Новосибирск	92
Лиджиев В.Д., Хромова И.В.	Новосибирск	95
Лозовский М.В., Гоппе А.А., Горбачев М.В.	Новосибирск	96
Попов Д.Р., Гиорбелидзе М.Г.	Самара	100
Тоескин В.А., Коротаяева В.А., Чичиндаев А.В.	Новосибирск	103
Уперчук Р.А., Сачук Д.В.	Самара	106
Уперчук Р.А., Сачук Д.В.	Самара	109
Хафизов Д.Е., Казанцев В.В., Ефремов С.В.	Томск	113
Чушкина Е.П., Хромова И.В.	Новосибирск	116

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

Адрияшкина Т.Р., Гуськов А.В.	Новосибирск	119
Белоусова Н.С.	Новосибирск	123
Гриф Е.М.	Новосибирск	127
Зубашевский К.М., Стояновский О.И.	Новосибирск	131
Иванников Н.С., Потанина Е.Ю., Брагунцов Е.Я.	Новосибирск	135
Квашнёв А.А., Хребтова М.С.	Новосибирск	140

Кирюхина В.А., Нестерова А.А., Гуськов А.В.	Новосибирск	144
Немировский Ю.В., Литвинов В.Л.	Новосибирск	148
Морозов М.А., Калашников А.С., Милевский К.Е.	Новосибирск	152
Цыбрий А.И., Назаров С.С., Милевский К.Е.	Новосибирск	156
Нестерова А.А., Кирюхина В.А., Гуськов А.В.	Новосибирск	160
Шарков А.В., Балаганский И.А.	Новосибирск	165

**Секция ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

Архипова В.К., Федрак А.М., Елистратова Е.В.	Новосибирск	169
Вентлянд Е.П., Панченко В.Н.	Новосибирск	174
Власова Д.А., Цускман Е.И.	Новосибирск	178
Квашнина К.Е., Коротаева Т.А.	Новосибирск	182
Копаненко А.С., Гуськов А.В.	Новосибирск	185
Коренюк А.Ю., Матус Е.В., Керженцев М.А.	Новосибирск	188
Лапин А.В., Бердникова Л.К., Горбунов Ф.К.	Новосибирск	191
Лапташ Б.Д., Тимофеева М.Н.	Новосибирск	195
Мурашкина Ю.С.	Томск	198
Нефедова Д.В., Фиоре А.М., Петрелли В., Толстихина Д.В.	Новосибирск, Бари	201
Онищенко А.П., Немущенко Д.А., Ларичкин В.В.	Новосибирск	205
Толстихина Д.В., Нефедова Д.В., Петрелли В.	Новосибирск	209
Шеболтасов А. Г., Верниковская Н. В., Чумаченко В. А.	Новосибирск	211
Яковлева Л.А., Александров В.Ю.	Новосибирск	215

НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ
Сборник научных трудов в 9 частях

г. Новосибирск, 30 ноября-04 декабря 2020 г.
Часть 9
Под ред. Гадюкиной А.В.

Подписано в печать 16.12.2020. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Уч.-изд. л. 13,02. Печ. л. 14. Тираж 100 экз. Заказ № 44
Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

