

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



Новосибирск
2024

Всероссийская научная
конференция молодых ученых

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

Сборник
научных трудов

Часть 10

г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.

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

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

**XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых
г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.**

**Сборник научных трудов
в 11-и частях**

Часть 10

НОВОСИБИРСК
2024

УДК 62(063)
ББК 72.5я431
Н34

Н34 НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ: XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых (г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.) // Сборник научных трудов в 11 ч. / Под ред. Соколовой Д.О. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2024.

ISBN 978-5-7782-5128-1
Часть 10: – 191 с.
ISBN 978-5-7782-5138-0

В сборнике опубликованы материалы научных исследований, представленных на XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых.

В части 1 сборника представлены материалы по направлению «Информатика, автоматика, вычислительная и измерительная техника». В части 2 сборника представлены материалы по направлению «Информационные технологии математического моделирования и обработки данных». В части 3 сборника представлены материалы по направлению «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств. Материаловедение, технологические процессы и аппараты». В части 4 сборника представлены материалы по направлению «Энергетика». В части 5 сборника представлены материалы по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». В части 6 сборника представлены материалы по направлению «Электроника и биомедицинская техника». В части 7 сборника представлены материалы по направлению «Экономика и управление». В частях 8 и 9 сборника представлены материалы по направлению «Гуманитарные науки и современность». В части 10 сборника представлены материалы по направлению «Актуальные проблемы авиаракетостроения». В части 11 сборника представлены материалы по направлению «Экология и техносферная безопасность».

УДК 62(063)
ББК 72.5я431

ISBN 978-5-7782-5138-0 (Ч.10)
ISBN 978-5-7782-5128-1

© Коллектив авторов, 2024
© Новосибирский государственный
технический университет, 2024

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

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО
ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ
РАСЧЕТОВ ТЕЧЕНИЙ ДЕТОНАЦИИ**

А.А. Афанасенков

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, afanassenkov.2016@stud.nstu.ru**

Научный интерес к изучению процессов детонации в газовзвесьях с реагирующими частицами обусловлен с точки зрения как взрывопожаробезопасности, так и возможности влиять на характер детонационных течений. Так как проведение физических экспериментов является трудо- и финансово-затратным процессом, в настоящее время активно развиваются методы численного моделирования подобных процессов на основе физико-математических моделей механики гетерогенных сред с учетом процессов горения. Однако для расчета подробных моделей требуется большое количество машинных часов, и чтобы снизить время расчетов применяются технологии параллельного программирования.

Scientific interest in the study of detonation processes in gas suspensions with reacting particles is due to both explosion and fire safety and the possibility of influencing the nature of detonation flows. Since conducting physical experiments is a labor- and financially-costly process, methods of numerical modeling of such processes based on physical and mathematical models of heterogeneous media mechanics taking into account the combustion processes are being actively developed. However, the calculation of such models requires a large number of machine hours, and parallel programming technologies are used to reduce the calculation time.

Физико-математическая модель. Для описания детонационных течений применяются уравнения Эйлера, вытекающие из законов сохранения массы, импульса и энергии для всех фаз и компонент с учетом их баланса. Реакции взаимодействия водорода и кислорода с образованием воды описываются в рамках модели одностадийной кинетики аррениусовского типа [1], расширенной для бедных смесей.

Горение частиц алюминия описывается на основе модели Федорова А.В [2], расширенной для субмикронных и наноразмерных частиц [3]. При горении алюминия, в зависимости от температуры, образуются либо частицы оксида алюминия, либо смесь газообразных субоксидов.

Численный метод. Для решения задачи инициирования и распространения гибридной детонации в плоском канале, заполненном

водород-воздушной смесью с частицами алюминия $1.2H_2 + O_2 + 3.82N_2 + Al$, используется явная TVD-схема 2-го порядка аппроксимации для расчета газовой фазы и схема Джентри-Мартина-Дейли для расчета дискретной фазы. Для ускорения расчетов использовалась библиотека OpenMP, что позволило сократить время расчетов в 5.7 раз на 8-ми потоках (рис.1)

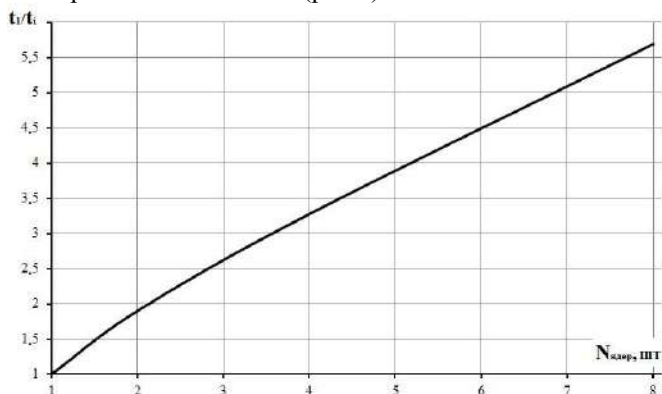


Рис.1 – График сокращения времени для расчета задачи в одномерной постановке при использовании OMP с разным количеством потоков

Результаты. На рис.2 представлен пример расчета задачи инициирования и распространения ячеистой детонации в водород-воздушной смеси со стехиометрическим соотношением $\varphi = 0.6$ без добавления частиц алюминия. В газовой смеси ячеистая структура нерегулярна, средняя скорость детонации $D = 1.68 \text{ км/сек.}$

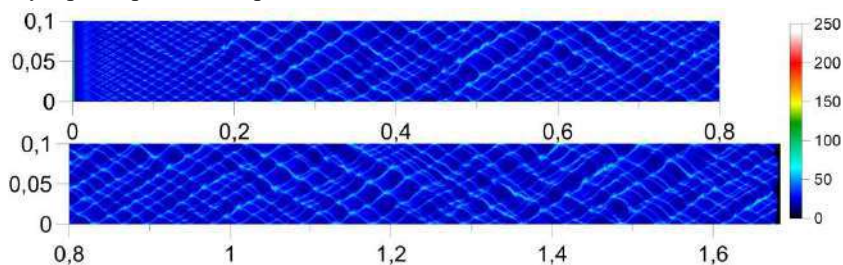


Рис.2 – Картина детонационного течения в бедной водород-воздушной смеси ($\varphi = 0.6$) без добавления частиц алюминия

На рис.3 представлен пример расчета задачи инициирования и распространения ячеистой детонации для водород-воздушной смеси со стехиометрическим соотношением $\varphi = 0.6$ с добавлением частиц

алюминия размером $d = 1 \text{ мкм}$ и плотностью $\rho_{20} = 10 \text{ г/м}^3$. В гибридной смеси при добавке небольшого количества алюминия ячеистая структура регулируется, скорость детонации увеличивается до $D = 1.7 \text{ км/сек}$.

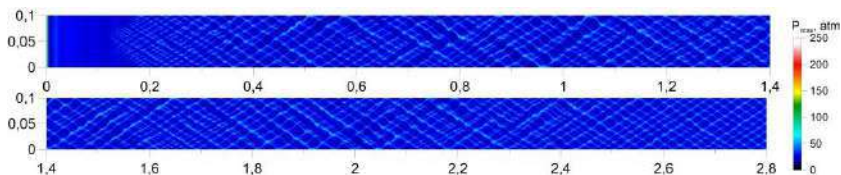


Рис.3 – Картина детонационного течения в бедной водород-воздушной смеси ($\varphi = 0.6$) с добавлением частиц алюминия (1 мкм)

плотностью $\rho_{20} = 10 \text{ г/м}^3$

Заключение. В ходе работы была разработана физико-математическая модель гибридной детонации. Распараллелена Fortran-программа с помощью библиотеки OpenMP, что позволило добиться ускорения расчетов в 5.7 раз. Так же проведены ряд параметрических расчетов, в ходе которых изучалось влияние добавки частиц алюминия на характер течения гибридной детонации, которые показали, что даже малая добавка частиц алюминия способствует регуляризации детонационного течения, а так же увеличению скорости распространения детонационной волны.

Литература:

1. Bedarev I.A., Rylova K.V., Fedorov A.V. Application of detailed and reduced kinetic schemes for the description of detonation of diluted hydrogen–air mixtures // Combust. Explos. Shock Waves. – 2015. – Vol. 51, № 5. – P. 528–539.
2. Хмель Т.А., Федоров А.В. Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде // ФГВ. – 2005. – Т. 41. №4. – С.84–98.
3. Хмель Т.А., Лаврук С.А. Моделирование ячеистой детонации в газозвесьях субмикронных частиц алюминия с различными распределениями концентрации // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58, No.3. –С. 3–18.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ ХОЛОДНЫМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ.

А.А. Лушов

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, lushov_02@mail.ru

Научный руководитель: Шикалов В.С., м.н.с. ИТПМ СО РАН

В работе представлены результаты влияния содержания плакированных частиц графит-никеля в напыляемой порошковой смеси на твердость, модуль упругости, электропроводность, и трибологические характеристики медно-матричных покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления. Инструментальное индентирование по методике Оливера-Фарра, показало, что увеличение содержания частиц графита-никеля способствует увеличению микротвердости и уменьшению модуля упругости. С ростом содержания плакированных частиц коэффициент трения снижается. Электропроводность покрытий уменьшается с увеличением концентрации частиц графит-никеля. Полученные экспериментальные результаты открывают перспективы использования холодного газодинамического напыления для получения антифрикционных токосяемных покрытий, применяемых в различных отраслях современной промышленности.

The work presents the results of the influence of nickel-coated graphite particles content in the feedstock mixture on the hardness, electrical conductivity, and tribological characteristics of copper-matrix coatings obtained by cold spraying. Instrumental indentation according to the Oliver-Farr method showed that an increase in the graphite-nickel content contributes to an increase in microhardness and a reduction in the elastic modulus. As the content of coated particles grow, the coefficient of friction decreases. The electrical conductivity of the coatings decreases with increasing concentration of graphite-nickel particles. The obtained experimental results open up prospects for the use of cold spraying to produce antifriction current-carrying coatings used in various fields of modern industry.

Применение антифрикционных металломатричных покрытий, обладающих электрической проводимостью, является эффективным способом обеспечения качественного токосяема и минимального износа в контактных парах трения в различных областях машиностроения. Одним из перспективных материалов для применения в данной сфере являются композиционные покрытия на основе медной матрицы и дисперсных включений графита. Применение такой композиции позволяет в процессе трения сформировать на поверхности покрытия тонкий антифрикционный слой, защищающий ее от изнашивания, и, одновременно обеспечить электрическую проводимость на приемлемом уровне. Холодное газодинамическое напыление (ХГН) является

привлекательным способом создания таких композитных покрытий с сохранением их фазового состава, равномерным распределением компонентов, минимальными остаточными напряжениями и высокой производительностью [1,2,3].

Для напыления покрытий использовались порошки меди и графит-никеля со средними размерами 59 и 89 мкм соответственно. Из данных порошков были приготовлены смеси с концентрацией 0, 20, 30 и 40 вес.%. В качестве подложек использовались пескоструенные пластины из алюминиевого сплава АМГ2М. Напыление покрытий проводилось на установке ХГН высокого давления (ИТПМ СО РАН, Россия) с использованием осесимметричного сопла Лавала. В качестве ускоряющего газа использовался азот с давлением торможения 4 МПа и температурой торможения 700°С. Механические испытания по измерению микротвердости и модуля упругости покрытий проводились методом инструментального индентирования на поперечных шлифах покрытий с помощью сканирующего нанотвердомера Наноскан 4D+ (ТИСНУМ, Россия). На каждом из поперечных шлифов были проделаны уколы с шагом 30 мкм и нагрузкой 2 Н. Испытания на сухой скользящий износ проводились на оборудовании UMT-2 (Bruker, Германия) в режиме возвратно-поступательного движения контртелом из сплава ВК6 с амплитудой 5 мм и частотой 5 Гц при постоянной нагрузке 25 Н. Измерения электропроводности проводились вихретоковым методом с использованием прибора Константа К6 (Россия).

С помощью метода ХГН была получена серия покрытий на основе медной матрицы с равномерно распределенными в ней включениями графит-никеля в диапазоне концентраций от 0 до 40 вес.%. Результаты измерения механических характеристик, полученные с помощью инструментального индентирования по методике Оливера-Фарра, показали, что микротвердость покрытий увеличивается от 1.114 ГПа до 1.328 ГПа с ростом концентрации графит-никеля от 0 до 40 вес. %, при этом модуль упругости уменьшается от 135.4 ГПа до 111.9 ГПа, соответственно. Результаты трибологических испытаний показали, что самое высокое значение скорости износа наблюдалось для покрытия с концентрацией графит-никеля 20 вес.% ($0.41 \cdot 10^{-4} \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$). Увеличение содержания графит-никеля в покрытии приводит к снижению скорости изнашивания (до $0.29 \cdot 10^{-4} \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ для покрытия Cu-C40). Самое маленькое значение скорости износа у покрытия из чистой меди ($0.098 \cdot 10^{-4} \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$). С ростом содержания плакированных частиц от 0 до 40 вес.% коэффициент трения снижается с 0.53 до 0.33 вследствие образования смазывающего

графитового слоя. Измерения электропроводности покрытий показали, что увеличение концентрации графит-никеля от 0 до 40 вес.% приводит к уменьшению электропроводности от 41.7 МСм/м до 16.3 МСм/м соответственно.

Полученные экспериментальные результаты открывают перспективы использования холодного газодинамического напыления для получения антифрикционных токосяемных покрытий, применяемых в различных отраслях современной промышленности.

Литература:

1. Chunjie Huang, Wenya Li, Yingchun Xie, Marie-Pierre Planche, Hanlin Liao, Ghislain Montavon Effect of Substrate Type on Deposition Behavior and Wear Performance of Ni-Coated Graphite/Al Composite Coatings Deposited by Cold Spraying // Journal of Materials Science & Technology. – 2016.

2. Wenyuan Chen, • Yuan Y, • Jiqiang Ma, • Shengyu Zhu, • Weimin Liu1, • Jun Yang Low-Pressure Cold Spraying of Copper–Graphite Solid Lubricating Coatings on Aluminum Alloy 7075-T651 // J Therm Spray Tech. – 2019.

3. Wenyuan Chen, Yuan Yu, Jun Cheng, Shuai Wang, Shengyu Zhu, • Weimin Liu, Jun Yang Microstructure, Mechanical Properties and Dry Sliding Wear Behavior of Cu-Al₂O₃-Graphite Solid-Lubricating Coatings Deposited by Low-Pressure Cold Spraying // J Therm Spray Tech. – 2018.

РАЗРАБОТКА ПИЛОТАЖНОГО ПЛАНЕРА

В.М. Морозов, Ф.А. Мороз

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, sahavova@ngs.ru

Научный руководитель: Зайцев В.Ю., начальник НИО-1 СибНИА

Разработан сверхлегкий планер в классе «до 115 кг», способный выполнять установленные требованиями фигуры высшего пилотажа. Получен опыт в разработке ЛА. Разработано техническое задание на основе статистических данных похожих планеров. Проведен расчёт геометрических размеров в первом приближении. 1) Анализ статистических материалов. 2) Выбор компоновки планера согласно требованиям. 3) Расчёт геометрических характеристик в первом приближении. 4) Расчёт массовых характеристик в первом приближении. 5) Расчёт крыла планера.

Development of an ultralight glider in the class "up to 115 kg", capable of performing aerobatics set by the requirements and gaining experience in aircraft

development. Development of technical specifications based on statistical data of similar gliders. Calculation of geometric dimensions in the first approximation. 1) Analysis of statistical materials. 2) The choice of airframe layout according to the requirements. 3) Calculation of geometric characteristics in the first approximation. 4) Calculation of mass characteristics in the first approximation. 5) Calculation of the airframe wing.

Эксплуатационно-технические требования к разрабатываемому планеру:

- 1) масса пустого планера не должна превышать 115 кг,
- 2) максимальная полётная масса не должна превышать 265 кг,
- 3) размах крыла не должен быть более 14 м,
- 4) допустимая перегрузка: +8...-4 единиц,
- 5) высокие маневренные характеристики.

Лётно-эксплуатационные требования к разрабатываемому планеру:

- 1) Ограничения по скоростям и перегрузке:
 - скорость сваливания - не более 60 км/ч,
 - посадочная скорость - 60 км/ч,
 - крейсерская скорость - 80 км/ч,
 - максимально допустимая скорость буксировки – 140 км/ч,
 - допустимая эксплуатационная перегрузка - +8...-4 ед.
- 2) Планер должен легко выполнять фигуры высшего пилотажа, соответствующие первой лиге в каталоге фигур высшего пилотажа Арести ФАИ, такие как:
 - штопор с нормальным выходом,
 - пикирование с выходом на скорости 170-200 км/ч,
 - петли,
 - одинарные и двойные перевороты,
 - Иммельман,
 - перевернутый полет,
 - колокол,и их вариации, с требованиями, предъявляемыми каталогом

Арести.

- 3) Полет с брошенной ручкой на нормальном планировании.
- 4) Максимальное качество k_{max} должно быть не менее 25.

Статистические данные по аналогичным ЛА приведены в табл.1.

Таблица 1 – Статистические данные

	H-101	Swift S-1	A-13	Fox MDM-1	КАИ-14	Л-13 Бланик	АС-4-115
Массо-габаритные характеристики							
Длина, м	5.7	6.91	6.4	7.4	5.82	8.4	5.25
Размах, м	13.3	12.67	12.1	14	15	16.2	12.6
Высота, м	0.88	-	1.6	2.2	-	1.14	1.3
Площадь крыла, м ²	8.58	11.69	10.4	12.3	9	19.15	7.7
Удельная нагрузка на крыло при максимальной взлетной массе, $\frac{кгс}{м^2}$	32.6	32.2	35.58	42.68	31.11	26.17	32.5
Ограничения по G	+7..-4.9	+10..7.5	-	+9..-6	+6	+6..-3	+5.3..-2.65
Масса пустого, кг	180	280	270	355	180	292	115
Максимальная полетная масса, кг	280	380	370	535	280	500	265
Используемый профиль крыла	FX66-17 All-182	NASA-64-412	П32-15	-	NASA-63-517	NASA 632	FX60-157
Летно-технические характеристики							
При полетной массе, кг	280	380	370			472	195
Скорость сваливания, км/ч	70	-	-	84	-	55	60
Посадочная скорость, км/ч	75	-	-	90	-	60	65

Эволю- тивная скорость, км/ч	-	180	-	-	-	145	150
Крейсер- ская скорость, км/ч	95	100	110	-	-	90	80
Скорость снижения при K_{max} , м/с	0.6	0.9	1.14	-	0.58	0.82	0.8
Макси- мально допусти- мая скорость буксиро- вки, км/ч	160	-	-	-	-	140	150
Макси- мально допусти- мая скорость взлета с механи- ческого старта, км/ч	130	320	-	-	-	120	110

Основываясь на данных табл.1 можно примерно обозначить габариты проектируемого планера, выбрать подходящий профиль и определить технические решения для уменьшения массы (табл.2).

Внешние геометрические обводы проекта планера приведены на рис.1.



Рис.1 – Модель проектируемого пилотажного планера до 115 кг в первом приближении

Таблица 2 – Таблица геометрических характеристик

Крыло	
Размах крыла, м	11.46
Площадь крыла, м ²	9.39
Удлинение	14
Хорда корневая, м	1.09
Хорда концевая, м	0.54
Средняя аэродинамическая хорда, м	0.82
Профиль крыла	FX66-17 All-182
Угол стреловидности (по линии 1/4 хорд), °	0°
Размах флаперона, м	5.73
Относительная хорда флаперона	0.25
Площадь флаперонов, м ²	1.17
Угол отклонения флаперонов в канале закрылков, °	± 5
Горизонтальное оперение	
Размах, м	2
Площадь горизонтального оперения, м ²	0.988
Удлинение	4
Хорда корневая, м	0.55
Хорда концевая, м	0.34
Плечо горизонтального оперения, м	3.31
Относительная хорда руля высоты	0.35
Площадь руля высоты, м ²	0.36
Коэффициент статической устойчивости, Аго	0.5
Вертикальное оперение	
Высота, м	1.1
Площадь, м ²	0.925
Плечо вертикального оперения, м	3.3
Площадь руля направления, м ²	1.5
Коэффициент статической устойчивости, Вво	0.025
Фюзеляж	
Длина, м	5.4
Ширина, м	0.65
Высота, м	0.85

В рамках проектирования пилотажного планера, основываясь на таблице статистических данных, были составлены основные требования к объекту разработки. Также были проведены расчёты в первом приближении основных геометрических характеристик, по которым был создан эскизный чертёж планера. Далее необходимо приступить к

рабочему проектированию, результатом которого станет технический проект планера.

Литература:

1. Расчёт, проектирование и постройка сверхлёгких самолётов. П.И. Чумак, В.Ф. Кривокрысенко. – Москва «Париот» 1991. – 235 с.
2. Атлас конструкции планеров. В.В. Шушурин. – Государственное издательство оборонной промышленности Москва 1938. – 105 с.
3. РЛЭ АС-4-11 5 – ООО «Авиастроитель» Пенза 2014. – 19 с.
4. РЛЭ SZD-48-3 «Jantar Standard 3» – Опытно-производственное предприятие планеризма «ПЗЛ-Бельско» I-издание 1984. – 48 с.
5. Проектирование лёгких и сверхлёгких летательных аппаратов. И.П. Вислов – М.: ССАУ им. С.П. Королёва Самара 2005. – 113 с.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОИТЕЛЯ РЕГУЛЯРНОЙ СЕТКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА

М.М. Харюшина

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

**Научный руководитель: Бойко А.В., д.ф.-м.н., чл. корр. РАН,
главный научный сотрудник ИТПМ СО РАН**

Представлены тезисы к докладу о преддипломной бакалаврской работе по разработке автоматического строителя регулярной сетки для расчета обтекания стреловидного крыла с использованием пакета вычислительной гидрогазодинамики OpenFOAM.

The thesis for the report on the bachelor's pre-graduate work on the development of an automatic builder of regular mesh for calculating the flow of a swept wing using the OpenFOAM computational fluid dynamics package is presented.

Цель данного проекта – создание трехмерной сетки для расчета обтекания стреловидного крыла в бесплатном программном обеспечении OpenFOAM, решающим сложные задачи механики жидкости (такие как турбулентное обтекание и теплопередача), акустики и многого другого. OpenFOAM – один из наиболее широко используемых свободно распространяемых газодинамических вычислительных пакетов. Однако в настоящее время имеется довольно мало расчетов OpenFOAM по ламинарно-турбулентному переходу в

пограничных слоях, результаты которых сравнивались бы с экспериментальными. В связи с этим актуальны исследования, направленные на определение расчетных параметров, необходимых для получения соответствующих результатов. В ИТПМ СО РАН были проведены обширные исследования, направленные на изучение ламинарно-турбулентного перехода на стреловидных крыльях [1, 2], поэтому именно такая модель была выбрана для данного проекта в качестве объекта расчетов в OpenFOAM.

Стреловидное крыло — это крыло, у которого передняя, задняя кромка и линия четверти хорд в проекции на базовую плоскость самолета отклоняются от нормали к его оси симметрии. При этом положительным считается направление к хвосту.

Решатели OpenFOAM основаны на методе конечных объемов [3]. Для работы программы окружающее тело пространство необходимо разбить на множество конечных объемов, то есть построить вычислительную сетку, в нашем случае, трехмерную. Сетки бывают регулярные и нерегулярные. Как правило, используются тетраэдральные (нерегулярные) и гексаэдральные (регулярные) сетки (рис.1). Хорошая сетка является необходимым условием для получения надежных результатов расчетов в области вычислительной гидродинамики. К соответствующим свойствам сетки относятся тип сетки, форма и размеры расчетной области, размер элементов и т.п. Однако в литературе нет однозначного мнения о том, какими должны быть эти свойства, поскольку нет универсальных критериев.

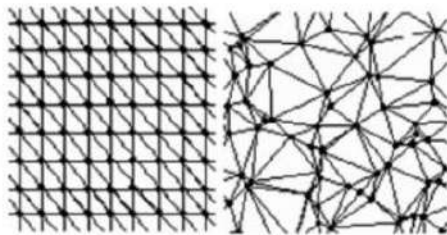


Рис.1 – примеры сеток, имеющих регулярную (слева) и нерегулярную (справа) структуру

Считается, что регулярные сетки более предпочтительные, чем нерегулярные по скорости сходимости. Однако их построение для сложных геометрий обычно требует ручного труда и очень затратно по времени.

Существует несколько свободных программ для генерации регулярных сеток вокруг двумерных круговых профилей: GMSH,

CFmesh и др. Однако подобные свободные программы для трехмерных крыльев, по-видимому, отсутствуют. При изучении ламинарно-турбулентного перехода требования к сеткам достаточно высоки в плане разрешения пограничного слоя (необходимо разрешать тонкий ламинарный пограничный слой, начиная от линии растекания, при этом нельзя использовать пристеночные функции, как в турбулентном течении). Проблема усложняется при необходимости моделировать течение вместе со стенками рабочей части аэродинамической трубы.

В задачи проекта входит:

- Создание интерфейса разрабатываемой программы с использованием программного обеспечения Qt;
- Построение базовых двумерных сеток;
- На их основе построение трехмерных сеток для стреловидного крыла;
- Оценка качества сеток с использованием инструментов OpenFOAM;
- Проведение тестовых расчетов в OpenFOAM обтекания двумерных и трехмерных стреловидных крыльев.

В перспективе предполагается сравнение расчетов с аналогичными в ANSYS Fluent и экспериментами.

Литература:

1. Бойко А.В., Кириловский С.В., Поплавская Т.В. Расчетные сетки для инженерного моделирования ламинарно-турбулентного обтекания // Прикладная механика и техническая физика. — 2022. — № 6. — С. 91-95.
2. Boiko A.V., Ivanov A.V., Borodulin V.I., Mischenko D.A. Quantification technique of transition to turbulence in boundary layers using infrared thermography // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2022. — № 183. — С. 1-11.
3. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics // Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 791 с.

О ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ РОТОРАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

А.Д. Черепанов

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, alexandrcherapanov2123@gmail.com

Научный руководитель: Иванов А.В., к.ф.-м.н., с.н.с.

Циклоидальный ротор – один из перспективных движителей для летательных аппаратов (ЛА), который может им обеспечить ряд преимуществ перед традиционными ЛА с винтами. В данной работе представлены исторический обзор развития концепции ЛА с циклоидальными роторами в качестве движителя и принцип работы циклоидального ротора с качающейся лопастью. Также выявлены значимые параметры, влияющие на тяговые и энергетические характеристики циклоидальных роторов. Предложена инженерная методика оценки их тяги.

The cycloidal rotor is one of the promising propellers for an aircraft, which may provide some advantages over traditional aircraft with propellers. This paper presents a historical overview of the development of the concept of aircraft with cycloidal and the principle of operation of a cycloidal rotor with a swinging blade. Significant parameters affecting the trust characteristics and energy efficiency of cycloidal rotors are selected. An engineer method of rotor trust evaluation is suggested.

Введение. Одним из перспективных движителей для летательного аппарата является циклоидальный ротор (ЦР). Аппараты на основе ЦР (циклокоптеры) имеют определенные преимущества перед традиционными ЛА с винтами, такие как пониженный уровень шума (актуально для городской среды), управляемый вектор тяги и, как следствие, повышенная маневренность.

Исследования в области циклоидальных движителей и попытки построить летательный аппарат на их основе были начаты более ста лет назад, и были в основном безуспешны, однако в последние годы эти работы сильно активизировались. Это связано прежде всего с развитием технологий, позволяющих сильно уменьшать массу и размер ЛА и повышать его эффективность (компактные, легкие двигатели и батареи; современные материалы, такие как композиты).

Краткий исторический обзор. Первые попытки построить летающий циклокоптер относятся к началу прошлого века. Большинство из них не включали систематических научных исследований (экспериментальных или теоретических) [1]. Это стало основной причиной того, что ни одна из этих попыток не увенчалась успехом, а во многих случаях даже не вышла за пределы стадии

проектирования. Интерес к ЦР стал быстро уменьшаться после успешной демонстрации обычных вертолетов, но научные исследования продолжались из-за преимуществ, которые могла обеспечить циклороторная система.

Первое значительное исследование ЦР было проведено в 1920-х годах профессором Куртом Кирстеном [2]. Он определил, что циклоидальный ротор способен поворачивать вектор тяги в любом направлении в плоскости его вращения. В рамках испытаний было разработано несколько поколений циклороторов. К сожалению, по результатам испытаний ЦР не превосходил по энергетическим и тяговым характеристикам обычный классический винт. Циклоротор со схемой движения лопастей предложенной Куртом Кирстеном сегодня часто называют ротором Кирстена-Боинга.

В 1920-е - 1930-е годы со своими роторами проводили исследования Джон Уитли и инженер Страндгрэн [3, 4] (рис.1). Их роторы отличались по схеме движения лопастей от ротора Кирстена-Боинга. Здесь и далее для определения такого типа циклоидного ротора мы будем называть его циклоидный ротор с качающейся лопастью (ЦРКЛ). Уитли и Страндгрэн также провели первые в истории аналитические исследования ЦРКЛ.

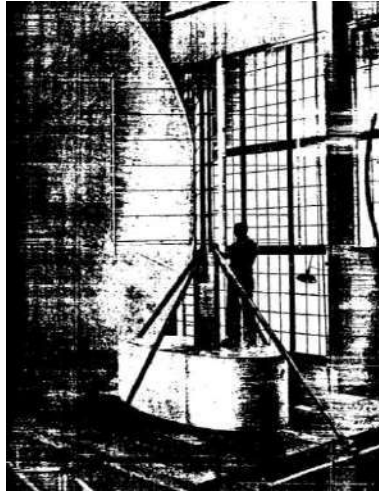


Рис.1 – Испытательный стенд Джона Уитли

Начало 2-й мировой войны и отсутствие успешных демонстраций транспортного средства с циклороторным двигателем привели к

значительному сокращению числа исследований, проведенных после работ Уитли и Страндгрена.

Дальнейшие систематические исследования циклороторов продолжились только в конце 1990-х годов. Bosch Aerospace предложила использовать циклороторы для 270-килограммового беспилотника [5]. Были проведены большие экспериментальные и аналитические исследования, но циклокоптер так и не взлетел (рис.2).

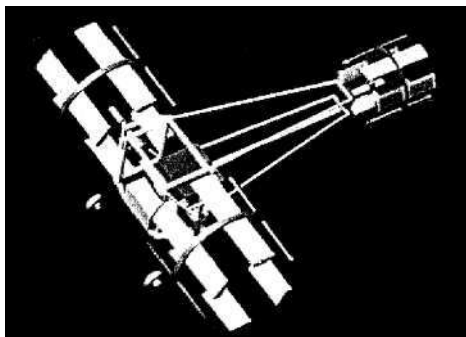


Рис.2 – Расположение ЦРКЛ на испытательной конструкции Bosch Aerospace

Принцип работы ЦРКЛ. В ЦРКЛ лопасти ориентированы по принципу лопастного колеса и при вращении ротора профилированная лопасть дважды за цикл занимает угол качания лопасти (УК), равный нулю, а между этими положениями отклоняется и занимает положительный или отрицательный угол для создания аэродинамической тяги (УК типично меняется от 0 до ± 40 -45 градусов). Лопасть вращается относительно оси ротора и одновременно способна поворачиваться вокруг собственной оси.

Наиболее распространенным механизмом для осуществления поворота лопасти в циклоидальных роторах является эксцентрик. При подаче управляющего воздействия меняется максимальный угол качания (МУК), а также величина и направление результирующей тяги. Направление создаваемой аэродинамической тяги может изменяться на 360 градусов в плоскости вращения.

Определение важных параметров, влияющих на аэродинамические и энергетические характеристики ЦРКЛ. На сегодняшний день несколько команд исследователей из разных стран (США, Китай, Италия, Россия и др.) работают над оптимизацией аэродинамических качеств и эффективности циклоидальных роторов с качающейся лопастью [6, 7, 8, 9, 10]. В их работах выделяется ряд параметров, влияющих на аэродинамические и энергетические

характеристики роторов. К ним относятся: толщина профилей лопастей ЦРКЛ, максимальный угол качания лопасти, форма лопасти в плане, расстояние от передней кромки до собственной оси качания лопасти, размах лопастей, удельная площадь лопастей (отношение площади лопастей к площади ометаемой поверхности), отношение хорды лопасти к радиусу ротора, количество лопастей. Наиболее значимыми среди перечисленных являются: профили лопастей ЦРКЛ, максимальный угол качания лопасти, удельная площадь лопастей, отношение хорды лопасти к радиусу ротора, количество лопастей.

Основные результаты работы, представленные в докладе:

1. Проведен исторический обзор разработок циклоидальных роторов.
2. Проанализирована современная доступная литература по циклоидным движителям.
3. В результате самостоятельно проведенного анализа количественных результатов испытаний циклороторов, найденных в открытой печати, автором выявлено, что к значимым параметрам ротора, существенно влияющим на его характеристики, должны быть отнесены: относительная толщина профиля лопасти, максимальные углы качания лопастей, удельная площадь лопастей, отношение хорды лопастей к радиусу ЦР, количество лопастей.
4. Предложена инженерная методика расчета тяги циклоротора на основе его геометрических параметров и скорости вращения ротора.

Литература:

1. "Cyclogyro History", World-Wide Web document, <http://www.rotoplan.narod.ru/historye.htm>, May 19, 2007.
2. Lee, J.P., & Bruckner, A.P. (2017). Let no new improvement pass us by: The history of the Kirsten-Boeing engineering company. AIAA SciTech Forum - 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0114>
3. Wheatly, J.B., & Windler, R., Wind-tunnel of a cyclogiro rotor. National Advisory Committee for Aeronautics, Tech. Rep., May 1935.
4. Strandgren, C., "The Theory of the Strandgren Cyclogyro," Technical Report 727, National Advisory Committee for Aeronautics, July 1933.
5. J. Boschma, "Modern Aviation Applications for Cycloidal Propulsion," in AIAA Aircraft, Technology Integration, and Operations Forum Proceedings, Los Angeles, CA, Oct. 16-18, 2001.
6. Dekterev A.A., Dekterev A.A., Dekterev D.A., Goryunov Y.N. (2019). Numerical study of the aerodynamic and power characteristics of the cycloidal rotor, under incoming flow. Вычислительные Технологии, 6(23), 25–34. <https://doi.org/10.25743/ict.2018.23.6.004>.

7. Benedict M., Jarugumilli T., Chopra I., “Experimental Optimization of MAV-Scale Cycloidal Rotor Performance, «Journal of the American Helicopter Society», Vol. 56, No. 2, April 2011, pp. 022005-1-022005-11.

8. Benedict M., Jarugumilli T., Chopra I. (2013). Effect of rotor geometry and blade kinematics on cycloidal rotor hover performance. Journal of Aircraft, 50(5), 1340–1352. <https://doi.org/10.2514/1.C031461>.

9. Hu Y., Lang Z., Tan C. (2015). The effect of the aerofoil thickness on the performance of the MAV scale cycloidal rotor (Vol. 119).

10. Xisto C., Leger J.A., Páscoa J.C., Gagnon L., Masarati P., Angeli D., Dumas A. (2016). Parametric analysis of a large-scale cycloidal rotor in hovering conditions. <http://www.crop.ubi.pt>.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

М.А. Шихова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, maqa.sun@inbox.ru**

Научный руководитель: Цырюльников И.С., к.т.н., доцент

В работе были изучено влияние пористых преград на характеристики ударной волны. Экспериментальная модель представляла собой ударную трубу круглого сечения длиной 1 м и диаметром 50 мм. Характеристики ударной волны исследовались по показаниям двух высокочастотных датчиков давления. Были исследованы различные пористые вставки, отличающиеся геометрией, пористостью и размерами вставок. В результате анализа данных было показано, что пористые вставки позволяют уменьшать интенсивность распространяющейся ударной волны.

The work studied the influence of porous barriers on the characteristics of the shock wave. The experimental model was a circular shock tube 1 m long and 50 mm in diameter. The characteristics of the shock wave were studied using the readings of two high-frequency pressure sensors. Various porous inserts differing in geometry, porosity and insert sizes were investigated. As a result of data analysis, it was shown that porous inserts make it possible to reduce the intensity of the propagating shock wave.

При прохождении фронта ударной волны вещество нагревается. Если ударная волна достаточно сильная, то температура за фронтом ударной волны может превысить температуру самовоспламенения вещества, и в ней начинаются экзотермические химические реакции, в ходе которых выделяется энергия, подпитывающая ударную волну. Т.е.

увеличение температуры и давления окружающей среды усиливает вероятность возникновения самопроизвольной детонации в газах. Классическая, или, как ее еще иначе называют, гидродинамическая теория детонации была разработана Д. Чепменом и Е. Жуге в 1899-1905 гг. и построена по аналогии с теорией ударных волн, базировавшейся на работах У.Д. Рэнкина и П.А. Гюгонно.

При отражении ударной волны от преграды вероятность возникновения самопроизвольной детонации возрастает, поэтому возникает задача уменьшения интенсивности ударной волны около преград. В данной работе предлагается способ снижения вероятности самопроизвольной детонацией на основе снижения скорости отраженной ударной волны с помощью пористых поверхностей.

Экспериментальный стенд представляет собой ударную трубу со следующими параметрами: $L=1$ м и $D=50$ мм, на одном конце которой находится полиэтиленовая диафрагма, а на другом конце размещались экспериментальные образцы-пористые поверхности. С помощью вакуумного насоса осуществлялось понижение давления внутри стенда. При разрушении диафрагмы формировалась ударная волна, которая распространялась до торца ударной трубы и отражалась назад, проходя через пористую поверхность дважды (прямой и обратный проход). В экспериментальный стенд были установлены, с внешней поверхности трубы, два датчика для измерения давления: первый на расстоянии 0.2 м от начала трубы, а второй – 0.2 м от конца трубы (перед пористой вставкой). Пористые поверхности в ходе экспериментов устанавливались в нескольких мм от торца экспериментального стенда. Пример пористых вставок демонстрируется на рис. 1.



Рис.1 – Пористые поверхности трех типов

Эксперимент был проведен в диапазонах параметров: начальное давление 55-90 кПа, отношение давления за ударной волной к давлению перед ударной волной – в пределах от 2.22 до 6.66, число Маха: 1.430-2.95.

На основе полученных данных в ходе эксперимента была вычислена амплитуда ударной волны и время между проходящей и отраженной ударной волной, что позволило определить число Маха ударной волны. Обработка данных выполнялась в программе LGraph2.

В процессе обработки получены графики ударных волн и их производные, по которым выявлена зависимость между пористой поверхностью и скоростью отраженной ударной волны. Пример полученных данных демонстрируется на рис.2.

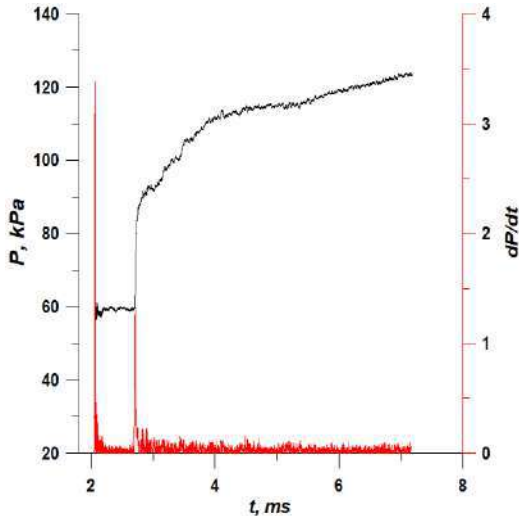


Рис.2 – Зависимость давления (черная кривая) и производной давления (красная кривая) от времени полученный для случая числа Маха=1.39 и при комплексном соединении трех пористых структур

В результате работы были получены следующие закономерности:

- 1) При уменьшении характерного диаметра пор наблюдалось более интенсивное снижение скорости ударной волны.
- 2) Лучшей воздействию достигается при сборке нескольких ячеистых структур (комплекс из нескольких пористых поверхностей).
- 3) Было обнаружено влияние дистанции между пористой вставкой и торцевой стенкой на исследуемое явление.

ВЛИЯНИЕ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЖЕСТКОСТЬ СОСТАВНОЙ СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ КРУЧЕНИИ

Т.В. Гульков

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

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

Составная анизогридная оболочка изготовлена из углепластика. В работе проводилось исследование устойчивости и напряжено – деформированного состояния конструкций с двумя типами силовых элементов: шпангоутами и сетчатыми перегородками. Для моделирования составной оболочки использовался конечно – элементный комплекс ANSYS Mechanical APDL. Рассчитан коэффициент жесткости оболочек с усилением.

The composite anisogrid shell is made of carbon fiber. The work carried out a study of the stability and stress-strain state of structures with two types of load-bearing elements: frames and mesh partitions. To model the composite shell, the ANSYS Mechanical APDL finite element complex was used. The stiffness coefficient of reinforced shells is calculated.

1. Моделирование составной оболочечной конструкции

Объектом исследования выступает составная анизогридная оболочка из композиционных материалов, которая раскладывается в безвоздушном пространстве в «рабочее» положение и скрепляется замками по основанию нижних шпангоутов (рис.1).

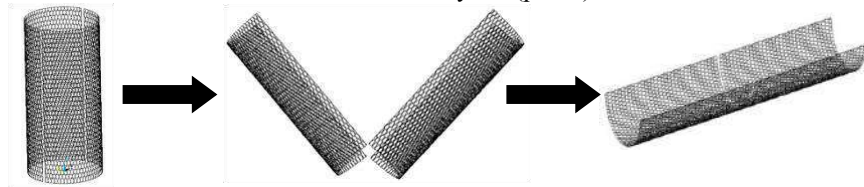


Рис.1 – раскрытие оболочки

Параметрическая модель оболочки была построена в конечно-элементном пакете Ansys Mechanical APDL. В качестве конечного элемента был выбран элемент BEAM4, который имеет по шесть степеней свободы в каждом узле. Построение оболочки проводилось путем копирования разработанного структурного элемента по полуокружности (рис.2, а). Скрепление половинок конструкции проводилось по нижнему шпангоуту жесткими элементами MPC184 (рис.2, б). В центральных

узлах верхних шпангоутов прикладывается противоположно направленный крутящий момент равный 1 тс*м (рис.2, в).

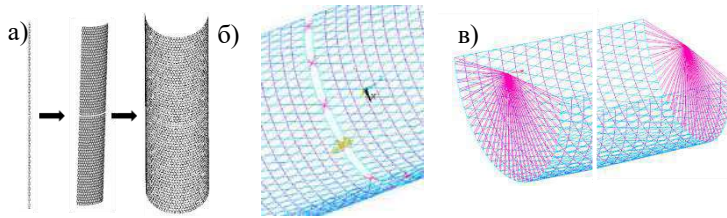


Рис. 2 – построение параметрической конечно – элементной модели
 а) подход к построению; б) закрепление половинок оболочки; в) приложенный момент

2. Усиление конструкции шпангоутами

Для повышения жесткости конструкции в модель добавлялось по одному, два и три шпангоута на каждую часть (рис.3).

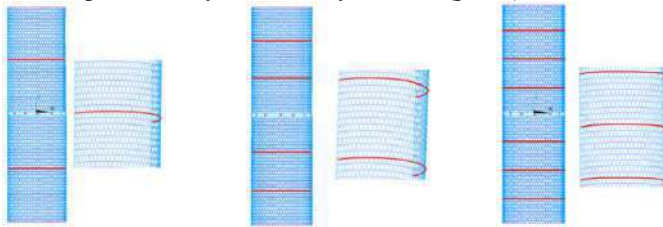


Рис. 3 – конечно-элементные модели с усилением

На рисунке 4 представлены поля напряжений в конструкциях, усиленных шпангоутами. Значения напряжений увеличиваются с ростом числа добавленных силовых элементов по сравнению с оболочкой без усиления на 8%, 11% и 17% соответственно.

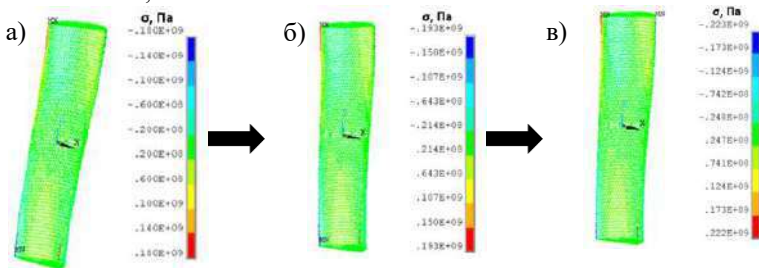


Рис. 4 – поля напряжений при усилении

а) одним шпангоутом; б) двумя шпангоутами; в) тремя шпангоутами

Рассмотрим формы потери устойчивости оболочек при кручении (рис.5). Значение критического крутящего момента для конструкции без

усиления составило 7298.91 Н*м, для конструкции с одним шпангоутом – 7003.62 Н*м, для конструкции с двумя шпангоутами – 7247.01 Н*м, а для конструкции с тремя шпангоутами – 7705.32 Н*м.

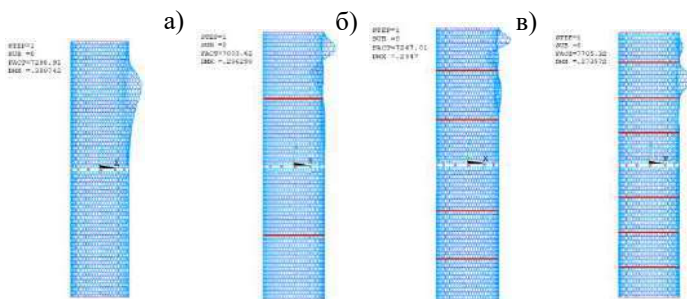


Рис. 5 – формы потери устойчивости при усилении

а) одним шпангоутом; б) двумя шпангоутами; в) тремя шпангоутами

3. Усиление конструкции сетчатыми перегородками

Рассматривалось усиление жесткости оболочки с помощью вставки сетчатых перегородок. В каждую составную часть оболочки добавлялись по одной, две и три сетчатые перегородки.

На рисунке 6 представлены поля напряжений в конструкциях, усиленных сетчатыми перегородками. Значения напряжений увеличиваются с ростом числа сетчатых перегородок по сравнению с оболочкой без усиления на 2%, 4% и 7% соответственно.

Проводился расчет усиленных конструкций на устойчивость. На рисунке 7 представлены формы потери устойчивости оболочек, усиленных перегородками при кручении. Значение критического крутящего момента для конструкции без усиления составило 7298.91 Н*м, для конструкции с одной перегородкой – 7284.47 Н*м, для конструкции с двумя перегородками – 7763.042 Н*м, а для конструкции с тремя перегородками – 8177.19 Н*м.

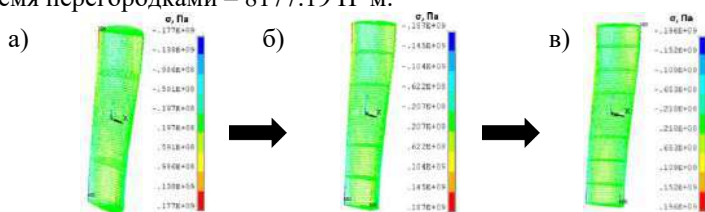


Рис. 6 – Поля напряжений при усилении

а) одной перегородкой; б) двумя перегородками; в) тремя перегородками

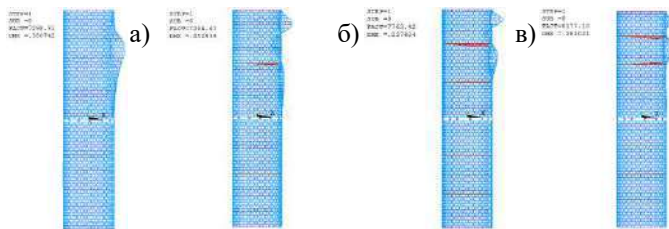


Рис. 7 – Формы потери устойчивости при усилении
а) одной перегородкой; б) двумя перегородками; в) тремя
перегородками

4. Жесткость конструкций с усилениями

Коэффициент жесткости оболочки рассчитывался по формуле:

$$k = \frac{M_{\text{крит}}}{\varepsilon}. \quad (1)$$

Коэффициент жесткости при усилении конструкции шпангоутами с увеличением их числа уменьшается (рис.8). При усилении конструкции сетчатыми перегородками коэффициент жесткости имеет зону роста относительно исходной модели. При усилении конструкции одной сетчатой перегородкой коэффициент жесткости на 5% выше, чем у исходной конструкции.

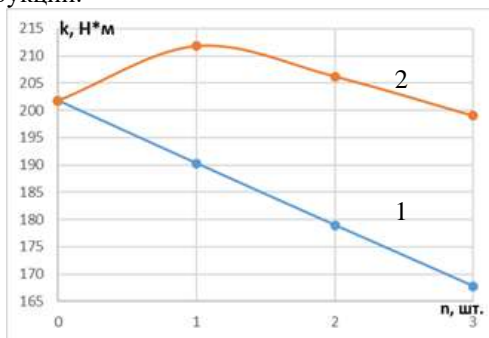


Рис. 8 – Коэффициент жесткости усиленных конструкций:
1 - шпангоутами; 2 - сетчатыми перегородками

Литература:

1. Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизогридной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при статическом нагружении = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static

loading / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. – DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-1-81-92. – Текст : непосредственный // Сибирский аэрокосмический журнал = Siberian Aerospace Journal. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 81–92.

2. Бурнышева Т. В. Моделирование и вычислительные методы в расчете напряженно-деформированного состояния сетчатых композиционных конструкций / Т. В. Бурнышева, О. А. Штейнбрехер // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред : сб. тр. 8 Всерос. науч. конф. с междунар. участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 18-19 декабря 2018 г.- Москва : Изд-во ИПРИМ РАН, 2019. - С. 219-229. - 250 экз. - ISBN 978-5-00077-851-7.

3. Бурнышева, Т. В. Решение задачи устойчивости сетчатых оболочек из композиционных материалов при статическом нагружении [Текст] / Т. В. Бурнышева, Ю.А. Кравцова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – №1. – С. 101-105.

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Д.О. Душухин

Новосибирский государственный технический университет,

ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»,

г. Новосибирск, dushuxin.2017@stud.nstu.ru

Научный руководитель: Бернс В.А.1,2, д-р. техн. наук, профессор

В работе показаны примеры вибрационной диагностики конструкций по искажениям портретов вынужденных колебаний. Рассмотрены такие виды дефектов, как зазоры в местах стыковки агрегатов, люфты в механических системах передачи усилий или перемещений, трещины. Результаты получены как на лабораторных образцах, так и в испытаниях натурных конструкций.

The paper shows examples of vibration diagnostics of structures based on distortions of portraits of forced vibrations. Such types of defects as gaps in the joints of aggregates, backlashes in mechanical systems of force or displacement transmission, cracks are considered. The results were obtained both on laboratory samples and in tests of full-scale structures.

Способ вибрационной диагностики возник как дополнение к стандартной методике модальных испытаний летательных аппаратов, но может использоваться и самостоятельно в других видах вибрационных

испытаний. Алгоритм оценки технического состояния следующий. Выбирается ряд форм колебаний, на которых амплитуды перемещений интересующих агрегатов наибольшие. Вблизи соответствующих этим формам резонансных частот в режиме установившихся вынужденных колебаний регистрируются временные сигналы датчиков ускорений во всех точках измерения. Эти сигналы представляются в виде портретов колебаний.

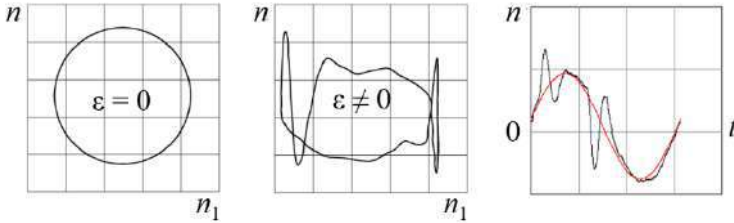


Рис.1 – портреты колебаний

Портрет строится в прямоугольной системе координат для каждого канала измерения на одном периоде колебаний: вертикальная развёртка портрета — полный сигнал датчика, горизонтальная — первая гармоника этого сигнала, сдвинутая по фазе на $\pi/2$. Портрет колебаний линейной динамической системы представляет собой окружность. Искажения портретов являются признаком нелинейности. Нелинейность может быть обусловлена трением или соударениями элементов конструкции (условным дефектом). Для определения величины искажений из полного сигнала вычитается его первая гармоника, а в остатке определяется абсолютный максимум. Величина этого максимума нормируется и принимается в качестве идентификационного признака «дефекта». Местоположение «дефекта» определяется положением датчика с наибольшими искажениями сигнала. При необходимости «дефектная» область обследуется другими методами.

Литература:

1. Использование портретов колебаний в процессе контроля технического состояния летательных аппаратов / В. А. Бернс, Е. А. Лысенко, Е. П. Жуков, П. А. Лакиза, Д. О. Душухин. // Полет: Авиация. Ракетная техника. Космонавтика. - 2022. – № 2. – С. 64–71.
2. Бернс, В.А. Диагностика и контроль технического состояния самолётов по результатам резонансных испытаний : монография / В.А. Бернс. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 272 с.
3. Идентификация дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций в процессе эксплуатации / В.А. Бернс, Е.А. Лысенко, Д.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОНЖЕРОНЕ КРЫЛА

Е.Ю. Ключникова

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kkluchnikova@bk.ru

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

В данной статье приведена методика и основные формулы для определения напряжений в лонжероне крыла летательного аппарата.

This article provides a methodology and basic formulas for determining stresses in the wing spar of an aircraft.

Требования, предъявляемые к летательным аппаратам, очень разнообразны и противоречивы. Например, самолет должен обладать хорошими летными и эксплуатационными характеристиками, но при этом также должен быть достаточно прочным и обеспечивать требуемый ресурс конструкции при минимальной массе агрегатов, имеющих относительно небольшие площади поперечных сечений (оперение, фюзеляж, крыло и др.). Прочность конструкций является одним из основных факторов обеспечения безопасности полетов любого летательного аппарата.

Одним из важнейших факторов, определяющих прочность конструкции, являются напряжения в её элементах. В данной работе представлена методика определения напряжений в одном из лонжеронов бипланной коробки крыльев самолета ПО-2.

Характеристики сечений были определены с помощью программного пакета Компас 3D. Силовые характеристики были определены в расчетах ранее, поэтому в данной статье считаем их известными. Расчет выполняется для случая А' – случая максимальной перегрузки.

Составим таблицу нагрузок в сечении для дальнейшего определения окончательных значений усилий в полках лонжерона (таблица 1.).

В конструкции используется сосна, сталь 20 и фанера, сведем характеристики этих материалов таблицу 2. [1]

Расчет по максимальным нормальным напряжениям в сжатой полке производится по формуле (F – суммарная площадь полков в сечении, $|S_{сж}|$

- модуль сжимающих усилий, $|M_{изг}|$ - изгибающий момент, W_y - момент сопротивления сечения):

$$\sigma_{сж} = \frac{|M_{изг}|}{W_y} - \frac{|S_{сж}|}{F} \leq [\sigma_{сж}]_c \quad (1)$$

Таблица 1 – Силовые характеристики

Номер сечения	Q , кг	M , кг·м	S , кг
1	-22.73	-10.88	-4009.7
2	-2.24	-15	-4009.7
3	18.25	-12.36	-4009.7
4	38.74	-2.96	-3291.7
5	59.24	13.2	-3291.7
6	79.73	36.14	-3291.7
7	100.22	65.83	-2638.2
8	120.72	102.29	-2638.2
9	-122.96	121.72	-2638.2
10	-102.47	84.53	-118.1
11	-81.97	54.1	-118.1
12	-61.48	30.43	-118.1
13	-40.99	13.52	-118.1
14	-20.49	3.38	-118.1
15	-1.24	1.2	0

Таблица 2 – Характеристики материалов

E_c , кг/м ²	E_{cm20} , кг/м ²	$[\sigma_{сж}]_c$, кг/м ²	$[\sigma_p]_c$, кг/м ²	$[\sigma]_{ст20}$, кг/м ²	$[\tau]_ф$, кг/м ²
$1.1 \cdot 10^6$	$21.3 \cdot 10^9$	$6.8 \cdot 10^6$	$8.3 \cdot 10^6$	$32 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$

По аналогичной формуле производится расчет растягивающих напряжений:

$$\sigma_p = \frac{|M_{изг}|}{W_y} + \frac{|S_{сж}|}{F} \leq [\sigma_{сж}]_p \quad (2)$$

Сделаем проверку по максимальным касательным напряжениям в стенках лонжерона по формуле ($|Q_{пер}|$ - модуль перерезывающей силы, $\delta_{ст}$ - толщина стенки лонжерона, S_y - статический момент сечения, I_y - момент инерции сечения):

$$\tau_{\max} = \frac{|Q_{\text{пер}}| \cdot S_y}{I_y \cdot 2\delta_{\text{ст}}} \leq [\tau]_{\phi} \quad (3)$$

Проверим прочность точки каждого сечения лонжерона (по третьей теории прочности), которая соответствует максимальному значению эквивалентного напряжения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{\text{сж}}^2 + 4\tau^2} \quad (4)$$

Расчеты были выполнены в программном пакете Mathcad. Все результаты представлены в таблице 3. На рисунке 1-2 графически отображены силовые воздействия на лонжерон крыла по сечениям. На рисунке 3 представлены допускаемые напряжения и полученные аналитически.

Таблица 3 – Результаты расчетов

Номер сечения	$\sigma_{\text{сж}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{раст}}, \text{МПа}$	$\tau_{\text{сдв}}, \text{Па}$
1	-17.35	1.83	-7136
2	-17.24	1.84	-703
3	-17.31	1.83	5729
4	-14.4	1.49	12160
5	-14.13	1.51	18590
6	-13.52	1.58	25030
7	-9.85	1.36	31460
8	-8.88	1.46	37890
9	-6.53	1.25	-62800
10	1.58	0.25	-52330
11	0.93	0.18	-64900
12	0.37	0.13	-48340
13	-0.44	0.1	-26700
14	-0.8	0.09	-15350
15	0.0012	0.0001	-2313

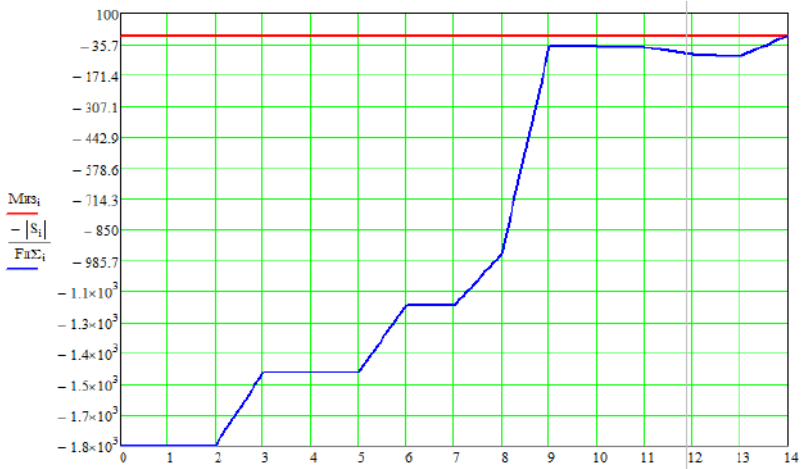


Рис.1 – изгибающий момент и сжимающие усилия



Рис.2 – перерезывающая сила

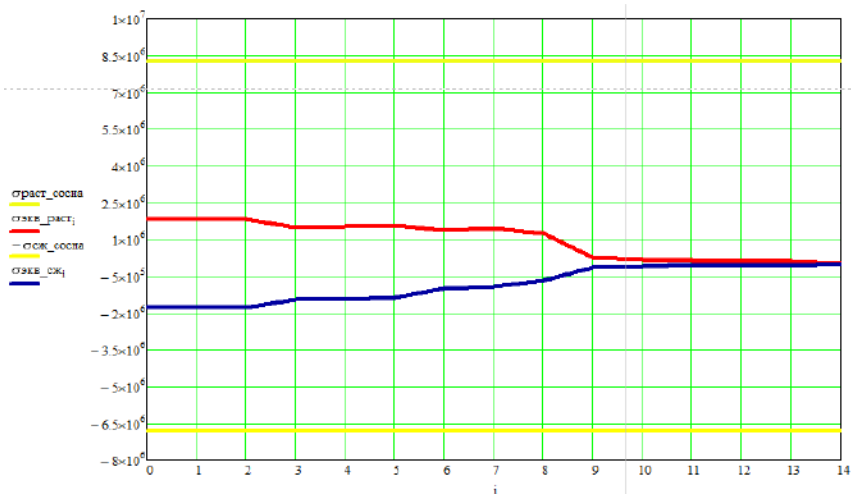


Рис.3 – эквивалентные напряжения и пределы прочности

Напряжения, полученные по приведенной методике, не превышают допусковых. Полученные данные позволят в дальнейшем определить запас прочности элементов крыла и провести модификацию конструкции. При значительном запасе прочности допускается уменьшение толщины полок.

Литература:

1. Малинин Г.Г., Авиационные стандарты. Справочник для инженеров и техников авиапромышленности. – М.: ЦАГИ, 1937. – 240 с.
2. Феодосьев В.И., Сопротивление материалов. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 1999. – 542 с.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ И КРУЧЕНИИ

Л.М. Ковальчук, Т.В. Бурнышева
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, tburn@mail.ru
Научный руководитель: Бурнышева Т.В., д.т.н., доцент

Рассмотрены анизогридные трансформируемые конструкции при кручении и сжатии. Построение конечно – элементной модели и расчет на напряженно деформированное состояние проводился в конечно – элементном комплексе ANSYS.

Anisogrid transformable structures under torsion and compression are considered. The construction of a finite element model and calculation of the stress–strain state was carried out in the ANSYS finite element complex.

Введение

В цилиндрической анизогридной оболочке с регулярной сетчатой структурой выполняются два вертикальных разреза. В таком сложенном виде сетчатая конструкция выводится на орбиту. Под действием специализированного устройства сложенная конструкция раскрывается в безвоздушном пространстве.

В собранном виде конструкция испытывает сжатие [1]. Разложенная конструкция в рабочем положении испытывает кручение.

Моделирование в Ansys Mechanical APDL

В конечно – элементную модель оболочки закладывались два типа элемента. Первый тип это балочный элемент BEAM4 с шестью степенями свободы на каждый узел для реберной структуры и продольных ребер. Второй тип это жесткий элемент MPC184 для жестких связей (рис.1).

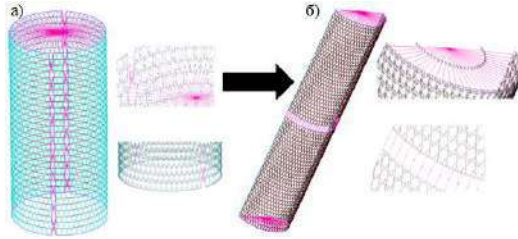


Рис.1 – конечно – элементные модели трансформируемых конструкций

- (1 – спиральные ребра (BEAM4); 2 – шпангоуты (BEAM4);
 3 – кольцевые ребра (BEAM4); 4 – продольные ребра (BEAM4);
 5 – жесткие связи (MPC184))

Граничные условия

К разрезанной сетчатой оболочке через мнимый узел расположенный по центру на высоте конструкций, и связанный с узлами на шпангоуте через топологические связи, прикладывается момент равный 1 т.с.:м или осевая сжимающая сила равная 102 т.с. К двум мнимым узлам разложенной конструкции прикладываются моменты равные 1 т.с.:м. На нижнем шпангоуте расположены сферические шарниры (рис.2(а)), а к разложенной конструкции фиксируется одна точка на нижнем шпангоуте (рис.2(б)).

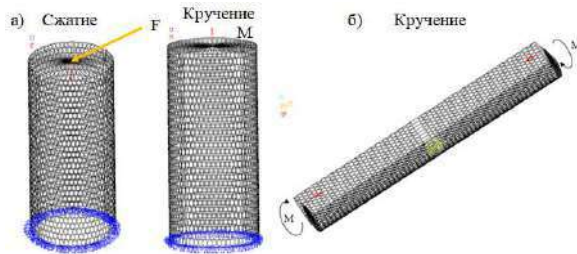


Рис.3 – граничные условия:

- а) для разрезанных конструкций; б) для разложенных конструкций

Напряжено – деформированное состояние трансформированных конструкций

После построения сетчатой оболочки с вертикальными разрезами и приложения граничных условий, переходим к расчету напряжено-деформированного состояния конструкций. На рис.3 – рис.5 приведены поля напряжений оболочек и их структурных элементов.

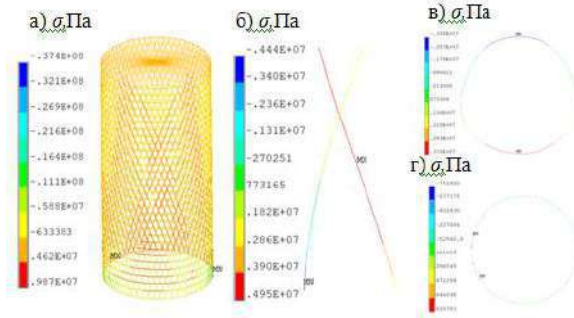


Рис.3 – поля напряжений конструкции с вертикальными разрезами при осевом сжатии:

- а) – поля напряжений всей конструкции; б) – спиральные ребра;
- в) – центральное кольцевое ребро; г) – нижний шпангоут

Таким образом, при сжатии анизотридной конструкции с вертикальными разрезами в спиральных и кольцевых ребрах возникают зоны растяжения и сжатия за счет нарушения целостности реберной структуры и расположенных вдоль разрезов продольных ребер [2,3].

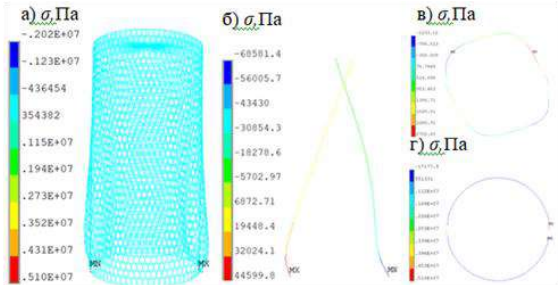


Рис.4 – поля напряжений конструкции с вертикальными разрезами при кручении

- а) – поля напряжений всей конструкции; б) – спиральные ребра;
- в) – центральное кольцевое ребро; г) – нижний шпангоут

Анализ напряженного состояния [4,5] конструкций с вертикальными вырезами при кручении позволяет сделать вывод:

- спиральные ребра с наклоном влево сжимаются, а с наклоном вправо растягиваются;
- кольцевые ребра имеют зоны как растяжения так и сжатия.

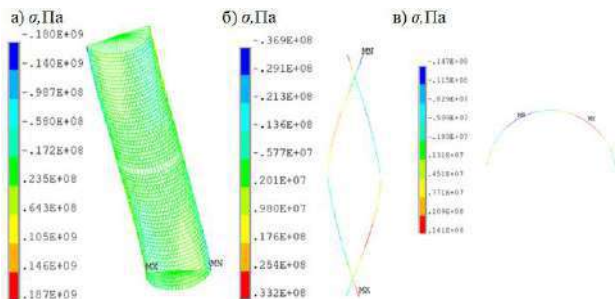


Рис. 5 – поля напряжений конструкции с вырезами в виде двух структурных элементов с 60 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 20° при кручении

а) – поля напряжений всей конструкции;

б) – спиральные ребра; в) – центральное кольцевое ребро

Анализ напряжений конструкции разложенном виде при кручении показал следующее:

- на спиральных ребрах располагаются зоны растяжения, потом сжатия;
- кольцевые ребра имеют зоны растяжения и сжатия чередующиеся между собой;
- на концах ребер наблюдаются краевые эффекты в виде завышенных значений напряжений.

Во всех конструкциях зоны максимальных и минимальных напряжений располагаются на продольных ребрах.

Литература

1. Lopatin, A. V., Burov, A., Khakhlenkova, A. A. Deformation analysis of cylindrical lattice body of spacecraft in zone of high-pressure tank attachment. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2021. - P. 1-5.
2. Ковальчук Л. М. Анализ деформирования ребер сетчатых цилиндрических оболочек при кручении = Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. – Текст : непосредственный // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 23 Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию основания конструкторского бюро «Туполев», Новосибирск, 20–22 апр. 2022 г. : в 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – Т. 1. – С. 43–47.
3. Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотридной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при статическом нагружении = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static

loading / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. – DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-1-81-92. – Текст : непосредственный // Сибирский аэрокосмический журнал = Siberian Aerospace Journal. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 81–92.

4. Ковальчук Л. М. Конечно-элементный расчёт на прочность и устойчивость анизотридной оболочки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева ; науч. рук. Т. В. Бурнышева. – Текст : непосредственный // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 16 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г. : в 11 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – Ч. 11. – С. 30–34.

5. Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотридной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при статическом нагружении = Investigation of the stress state and evaluation of the stability of an anisotropic cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. - Текст : электронный // Решетневские чтения : материалы 25 междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракетно-косм. систем М. Ф. Решетнева, Красноярск, 10–12 нояб. 2021 г. : в 2 ч. – Красноярск : Изд-во СибГУ, 2021. – Ч. 1. – С. 89-91 - URL: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii> (дата обращения: 25.01.2022).

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТА В СРЕДЕ ANSYS

В.С. Косачева

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, nika12rom16@gmail.com**

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

Работа посвящена анализу напряженно-деформированного состояния моторамы самолета ТВС-2МС (модификация Ан-2). Для анализа НДС новой моторамы был применен пакет конечно-элементного моделирования ANSYS Workbench. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами расчета специалистов «СибНИИ им. С.А. Чаплыгина».

The work is devoted to the analysis of the stress-strain state of the engine frame of the TVS-2MS aircraft (modification of the An-2). The ANSYS Workbench finite element modeling package was used to analyze the VAT of the new motorama. The results obtained are in good agreement with the calculation results of the specialists of SibNIA named after S.A. Chaplygin.

ТВС-2МС — это модификация Ан-2, в которой используется силовая установка Honeywell ТРЕ331-12, взлётной мощностью 1100 л. с. и работающей на авиационном керосине, что позволяет увеличить полезную нагрузку, уменьшить стоимость и увеличить доступность эксплуатации самолёта [1].

Установка нового двигателя с меньшей массой привело к изменению центровки самолёта, в связи с чем была разработана новая моторама и перекомпонован двигательный отсек для установки дополнительного оборудования. Моторама предназначена для установки двигателя на самолет. Она должна быть достаточно прочной, чтобы во всех положениях самолета выдерживать нагрузку от веса двигателя.

Моторама самолета ТВС-2МС представляет собой сборную конструкцию, состоящую из шести регулируемых тяг $\text{Ø}54 \times 2$, пяти кронштейнов, переднего шпангоута и четырех секций заднего шпангоута. Материал тяг моторамы 30ХГСА, материал переднего шпангоута Д16чТ [2].

Схема конструкции моторамы представлена на рисунке 1.

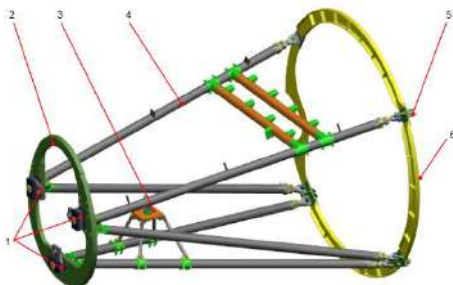


Рис.1. – моторама самолета ТВС-2МС; 1 – передние узлы крепления двигателя; 2 – передний шпангоут; 3 – задний узел крепления двигателя; 4 – тяги моторамы; 5 – узлы крепления моторамы к фюзеляжу; 6 – промежуточный шпангоут.

Нагрузка будет сам вес двигателя и винта. Также будем рассматривать конструкцию при нагрузке в 6000Н со стороны двигателя.

При исследовании конструкции на устойчивость мы получили, что и при нагрузке со стороны двигателя, и при обычной тяжести от сил гравитации получаем, что ни один множитель по модулю не является меньше 1, а значит конструкция устойчива и имеет некий запас на приложение нагрузки.

В соответствии с источником [3] наибольшие усилия на узлы навески со стороны двигателя соответствуют расчётным случаям,

представленным в таблице 1. По результатам СибНИА будем сравнивать данный расчет.

Итого для подсчета напряжения конструкции лучше всего подходит элементы сетки размером 0,01, т.к. с нагрузкой в 6000Н в СибНИА [1], напряжения получаются 57,5МПа, а перемещение 8 мм. При сравнении перемещений, которые вышли при эксперименте в СибНИА, получилась разница в 4,17%, при сравнении напряжений получилась разница в 4,9% [4].

При исследовании конструкции на устойчивость мы получили, что и при нагрузке со стороны двигателя, и при обычной тяжести от сил гравитации получаем, что конструкция устойчива и имеет некий запас на приложение нагрузки.

Максимальные напряжения не превышают предела прочности и предела текучести данного материала, а значит конструкция является довольно прочной.

Литература:

1. Руководство по летной эксплуатации самолета ТВС-2МС/ Анохин Г.Г.; Москва 2015. - 86 с.
2. Сборка моторамы двигателя ТРЕ331-12 самолета Ан-2 для проведения модернизации силовой установки (замена двигателя АШ-62ИР на ТРЕ331-12): технологический процесс/ Герасимов Р.Н.; Новосибирск, 2015. – 23 с.
3. Расчёт НДС моторамы вс «Ан-2» и нагрузок на узлы навески двигателя ТРЕ-331-12UHR / Отчёт СибНИА / Ю.И. Бадрухин – Новосибирск: 2012. – 13 с.
4. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. / А.В. Жидков: Учебно-методический материал. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2006. — 115 с.

О РАСЧЕТЕ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

К.М. Нгуен ¹, Д.Р. Шелева ^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН,

г. Новосибирск, krasnorutskiy@corp.nstu.ru

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

В работе приведена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих статическое и динамическое деформирование осесимметричных оболочек вращения. Особенностью данных уравнений является возможность описывать меридиан с изломами и скачками кривизны без стыковки решений. Численное решение тестовой задачи сравнивается с решением, полученным в ANSYS.

The paper presents a system of nonlinear differential equations describing static and dynamic deformation of axisymmetric shells of rotation. The peculiarity of these equations is the possibility to describe the meridian with bends and jumps of curvature without docking of solutions. The numerical solution of the test problem is compared with the solution obtained in ANSYS.

Данная работа является логическим продолжением [1], где были получены геометрически линейные уравнения для естественной параметризации разрешающих функций. В работе [2] автором получены линейные уравнения для произвольной параметризации функций. В настоящей статье приведены результаты работы по выводу геометрически нелинейных уравнений статического и динамического деформирования с учетом сдвига, больших продольных деформаций, для произвольной параметризации в безразмерном виде. Для описания осесимметричной оболочки используется цилиндрическая система координат, как показано на рис. 1.

Опустим вывод уравнений в силу невозможности уместить все выкладки и рассуждения в формате данной статьи. В конечном виде система безразмерных нелинейных дифференциальных уравнений движения при произвольной параметризации функций имеет следующий вид (если положить ускорения равными нулю – получим уравнения статики):

кинематические соотношения:

$$\frac{d\bar{U}_r}{d\xi} = (1 + \varepsilon_2) (\bar{a}_r + \bar{a}_z \bar{\theta}) - \bar{r}_{z\xi}, \quad (1)$$

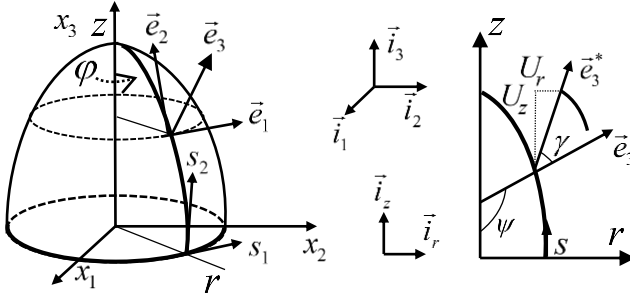


Рис.1 – геометрия и деформация оболочки вращения

$$\frac{d\bar{U}_z}{d\xi} = (1 + \varepsilon_2)(\bar{d}_z - \bar{d}_r \bar{\theta}) - \bar{z}_{,\xi}, \quad (2)$$

уравнение упругости:

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = -\frac{\bar{s}_{,\xi}}{h f_h^3} \bar{M}_{2\varphi} - \nu \bar{s}_{,\xi} \Delta \bar{k}_1, \quad (3)$$

где $\Delta \bar{k}_1 = \frac{1}{\bar{s}_{,\xi} \bar{r}} [\bar{z}_{,\xi} (\cos \gamma - 1) + \bar{r}_{,\xi} \sin \gamma]$, $\Delta \bar{k}_2 = \gamma_{,\xi}$;

уравнения равновесия:

$$\frac{d\bar{T}_{2r}}{d\xi} = -A \bar{T}_{2r} + \frac{\bar{s}_{,\xi}}{\bar{r}} B \bar{T}_{1\varphi} - \bar{s}_{,\xi} (1 + \varepsilon_2) \frac{(1 - \nu^2)}{E h} \left(q_r - \ell^2 \rho h \ddot{U}_r \right) \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{T}_{2z}}{d\xi} = -A \bar{T}_{2z} - \bar{s}_{,\xi} (1 + \varepsilon_2) \frac{(1 - \nu^2)}{E h} \left(q_z - \ell^2 \rho h \ddot{U}_z \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{M}_{2\varphi}}{d\xi} = & -A \bar{M}_{2\varphi} - \frac{\bar{r}_{,\xi}}{\bar{r}} B \bar{M}_{1s} - \frac{12}{h} (1 + \varepsilon_2) (\bar{T}_{2r} \bar{d}_z - \bar{T}_{2z} \bar{d}_r) - \\ & - \frac{\bar{s}_{,\xi} \rho h \ell^2 (1 - \nu^2)}{(1 + \varepsilon_1) E} \ddot{\gamma}. \end{aligned} \quad (6)$$

Дополнительные выражения и обозначения:

$$\bar{d}_r = (\bar{r}_{,\xi} \cos \gamma - \bar{z}_{,\xi} \sin \gamma), \quad \bar{d}_z = (\bar{r}_{,\xi} \sin \gamma + \bar{z}_{,\xi} \cos \gamma), \quad \bar{\theta} = \frac{E(\bar{d}_z \bar{T}_{2r} - \bar{d}_r \bar{T}_{2z})}{\kappa G (1 - \nu^2) \bar{s}_{,\xi} f_h},$$

$$A = \left(\frac{\bar{r}_{,\xi}}{\bar{r}} + \frac{\varepsilon_{1,\xi}}{(1 + \varepsilon_1)} \right), \quad \varepsilon_{1,\xi} = \left(\frac{\bar{r}_{,\xi}}{\bar{r}^2} \bar{U}_r - \frac{1}{\bar{r}} \frac{d\bar{U}_r}{d\xi} \right), \quad B = \frac{(1 + \varepsilon_2)}{(1 + \varepsilon_1)},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\bar{r}} \bar{U}_r, \quad \varepsilon_2 = \exp(\hat{\varepsilon}_2) - 1, \quad \hat{\varepsilon}_2 = \frac{\bar{T}_{2r} \bar{d}_r + \bar{T}_{2z} \bar{d}_z}{\bar{s}_{,\xi} f_h(\hat{\varepsilon}_2)} - \nu \varepsilon_1,$$

$$f_h(\hat{\varepsilon}_2) = \exp \left[\frac{\nu}{\nu - 1} (\hat{\varepsilon}_1 + \hat{\varepsilon}_2) \right], \quad \hat{\varepsilon}_1 = \ln(1 + \varepsilon_1), \quad \bar{T}_{1\varphi} = f_h(\hat{\varepsilon}_1 + \nu \hat{\varepsilon}_2),$$

$$\bar{M}_{1s} = \bar{h} f_h^3 (\Delta \bar{k}_1 + \nu \Delta \bar{k}_2), \quad s_{,\xi} \equiv \frac{ds}{d\xi} = \sqrt{r_{,\xi}^2 + z_{,\xi}^2}. \quad (7)$$

нижний индекс после запятой означает дифференцирование по переменной; точки означают дифференцирование по времени t ; $s = s(\xi)$ – естественная координата меридиана (длина); ξ – параметр длины; $r = r(\xi)$, $z = z(\xi)$ – координаты точек меридиана; $U_r = U_r(\xi, t)$, $U_z = U_z(\xi, t)$ – перемещения точек меридиана при деформировании; $\gamma = \gamma(\xi, t)$ – угол поворота при деформировании; $T_r = T_r(\xi, t)$, $T_z = T_z(\xi, t)$ – проекции внутреннего усилия; $M_\varphi = M_\varphi(\xi, t)$ – внутренний момент; E – модуль упругости, G – модуль сдвига, κ – корректирующий коэффициент сдвига, ν – коэффициент Пуассона, $h = h(\xi)$ – начальная толщина оболочки; $q_r = q_r(\xi, t)$, $q_z = q_z(\xi, t)$ – проекции вектора давления, действующего на оболочку; $\ddot{U}_r(\xi, t), \ddot{U}_z(\xi, t)$ – проекции ускорения; $\ddot{\gamma}(\xi, t)$ – угловое ускорение.

Безразмерные величины в (1)-(7) введены следующим образом:

$$\bar{s} = \frac{s}{\ell}, \quad \bar{h} = \frac{h}{\ell}, \quad \bar{r} = \frac{r}{\ell}, \quad \bar{z} = \frac{z}{\ell}, \quad \bar{U} = \frac{U}{\ell}, \quad \bar{T} = \frac{(1-\nu^2)}{E \bar{h} \ell} T, \quad \bar{M} = \frac{12(1-\nu^2)}{E \bar{h}^2 \ell^2} M,$$

где ℓ – характерный размер (например длина меридиана).

Для замыкания системы уравнений (1)-(6) добавляются краевые условия – три в начале, три в конце интервала интегрирования. Решения краевой задачи для системы (1)-(6) выполним двумя способами: 1) в программе DARSYS [3], 2) в пакете Ansys. Сравним полученные результаты.

Рассмотрим задачу о деформировании составной оболочки под действием внутреннего распределённого давления P , радиус цилиндра $R = 0.5 \text{ м}$, высота цилиндра $H = 0.8 \text{ м}$, длина образующей конуса $L = 0.3 \text{ м}$, $\alpha = \pi / 6$, модуль упругости материала $E = 2.10^7 \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. Координаты точек меридиана удобно задать двумя участками на интервале $0 \leq \xi \leq 2$ следующим образом:

$$r(\xi) = \begin{cases} R - L \sin(\varphi)(1 - \xi), & 0 \leq \xi < 1 \\ R, & 1 \leq \xi \leq 2 \end{cases}$$

$$z(\xi) = \begin{cases} H + L \cos(\varphi)(1 - \xi), & 0 \leq \xi < 1 \\ H(2 - \xi), & 1 \leq \xi \leq 2 \end{cases}$$

Крайевые условия:

при $\xi = 0$: $\bar{T}_{2r} = \bar{T}_{2z} = \bar{M}_{2\varphi} = 0$; при $\xi = 2$: $\bar{U}_r = \bar{U}_z = \gamma = 0$.

Условия стыковки в DARSYS реализованы в автоматическом режиме (достаточно указать точки, в которых есть разрывы функций исходных данных), однако разработанные уравнения могут решаться без стыковки, но это приводит к пилообразному изменению (в пределах погрешности вычислений) рассчитываемого перемещения точки при плавном изменении дискретизации.

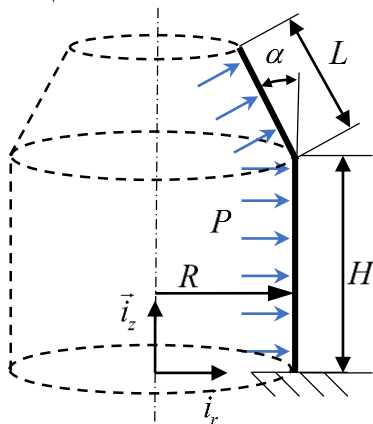


Рис.2 – составная оболочка. Расчетная схема

На рис. 3 приведены зависимости полного перемещения верхней точки меридиана составной оболочки ($\xi = 0$) от числа разбиений, рассчитанные с помощью скрипта APDL в ANSYS и по формулам (1)-(6) в DARSYS при значении давления $P = 1.8 \cdot 10^5 \text{ Па}$. На рис. 4 приведены рассчитанные зависимости перемещения той же точки от давления. Из рисунков видно, что результаты хорошо согласуются.

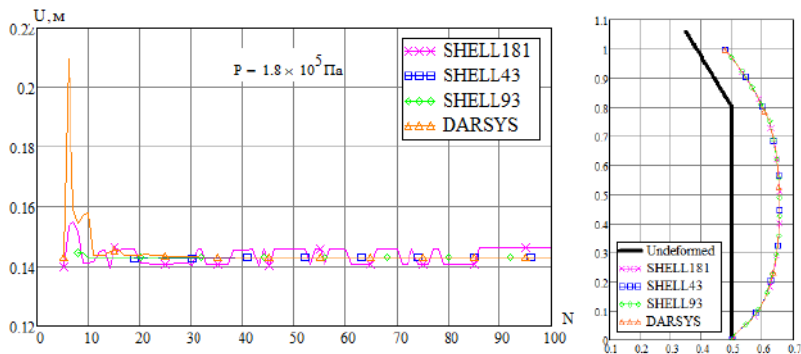


Рис.3 – сходимость перемещения при варьировании числа разбиений составной оболочки и соответствующая деформированная конфигурация

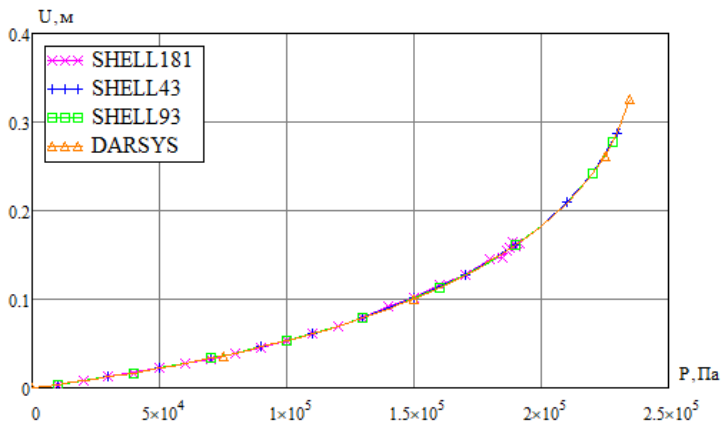


Рис.4 – зависимость перемещения верхней точки меридиана составной оболочки от давления

Система уравнений движения оболочки (1)-(6) при больших перемещениях и поворотах в матричном виде может быть представлена следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\xi} = \mathbf{F}(\xi, \mathbf{X}, \ddot{\mathbf{X}}), \quad (8)$$

где $\mathbf{X}(\xi, t) = \{U_r, U_z, \gamma, T_{2r}, T_{2z}, M_{2\varphi}\}^T$.

Рассмотрим новое равновесное состояние, близкое к состоянию (8), выраженное через малое отклонение:

$$\frac{d(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X})}{d\xi} = \mathbf{F}\left[\xi, (\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}), (\ddot{\mathbf{X}} + \Delta\ddot{\mathbf{X}})\right], \quad (9)$$

где $\Delta\mathbf{X}(\xi, t) = \{\Delta U_r, \Delta U_z, \Delta\gamma, \Delta T_{2r}, \Delta T_{2z}, \Delta M_{2\theta}\}^T$ – малое отклонение от (8).

Разложим (9) в ряд Тейлора в окрестности точки $(\mathbf{X}, \ddot{\mathbf{X}})$, оставим слагаемые, содержащие только первую степень функций-отклонений:

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

вычтем равновесное состояние (8):

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{d\xi} = \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\Delta\mathbf{X} + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}}\Delta\ddot{\mathbf{X}}. \quad (10)$$

Решение (10) будем разыскивать в экспоненциальном виде:

$$\Delta\mathbf{X}(\xi, t) = \Delta\mathbf{X}^A(\xi) \cdot \exp(i\omega t), \quad (11)$$

Подставим (11) в (10), для амплитуд сохраним прежнее обозначение без верхнего индекса «A»:

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{d\xi} = \left[\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}} - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}} \right] \Delta\mathbf{X}. \quad (12)$$

Для определения амплитуд-функций и частот малых колебаний к линейным дифференциальным уравнениям (12) необходимо добавить краевые условия в начале и конце стержня:

$$\mathbf{G}_1(\mathbf{X}, \ddot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{G}_2(\mathbf{X}, \ddot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}. \quad (13)$$

Задача определения $\Delta\mathbf{X}$ и ω из (12)-(13) – называется линейной краевой задачей на собственные значения. Для численного решения применим метод конечных разностей, решение будем искать в $N+1$ дискретной точке, разностная схема будет иметь следующий вид:

$$\left[\frac{\partial\mathbf{F}_i}{\partial\mathbf{X}} + \frac{2}{h_i}\mathbf{I} - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{F}_i}{\partial\ddot{\mathbf{X}}} \right] \Delta\mathbf{X}_i + \left[\frac{\partial\mathbf{F}_{i+1}}{\partial\mathbf{X}} - \frac{2}{h_i}\mathbf{I} - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{F}_{i+1}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}} \right] \Delta\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{0}, \quad i = 1..N. \quad (14)$$

Продлав те же операции разложения в ряд, линеаризации и вычитания равновесного состояния и подстановки решения (11), краевые условия (13) примут следующий вид:

$$\frac{\partial\mathbf{G}_1}{\partial\mathbf{X}}\Delta\mathbf{X}_1 - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{G}_1}{\partial\ddot{\mathbf{X}}}\Delta\mathbf{X}_1 = \mathbf{0}, \quad \frac{\partial\mathbf{G}_2}{\partial\mathbf{X}}\Delta\mathbf{X}_{N+1} - \omega^2 \frac{\partial\mathbf{G}_2}{\partial\ddot{\mathbf{X}}}\Delta\mathbf{X}_{N+1} = \mathbf{0}. \quad (15)$$

Проблема (14)-(15) может быть представлена как матричная обобщенная проблема собственных значений для узловых значений амплитуд малых колебаний:

$$(\mathbf{A} - \omega^2 \mathbf{C}) \mathbf{x} = 0, \quad (16)$$

где $\mathbf{x} = \{\Delta \mathbf{X}_1, \Delta \mathbf{X}_2, \dots, \Delta \mathbf{X}_{N+1}\}^T$.

Полученная обобщенная проблема решается с помощью пакета подпрограмм с открытым исходным кодом ARPACK в DARSYS [3].

Рассмотрим расчет собственных колебаний оболочки, данные которой приведены выше. В таблице 1 приведены частоты, рассчитанные в ANSYS и по уравнениям (1)-(6) в форме (16).

Таблица 1. Частоты собственных колебаний

Номер тона	Частоты (Гц)		Разница (%)
	ANSYS	DARSYS	
1	10.464	10.463	0.01
2	15.326	15.324	0.01
3	16.514	16.510	0.02
4	17.578	17.575	0.02
5	18.272	18.258	0.07

Из таблицы 1 видно, что результаты хорошо сходятся. На рисунках (4)-(8) приведены 5 первых осесимметричных форм собственных колебаний, ANSYS – слева, DARSYS – справа.

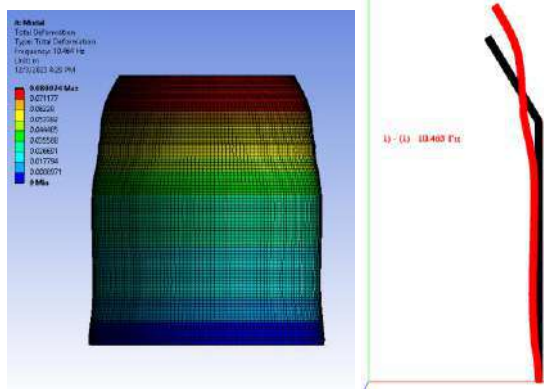


Рис.4 – первая осесимметричная форма колебаний

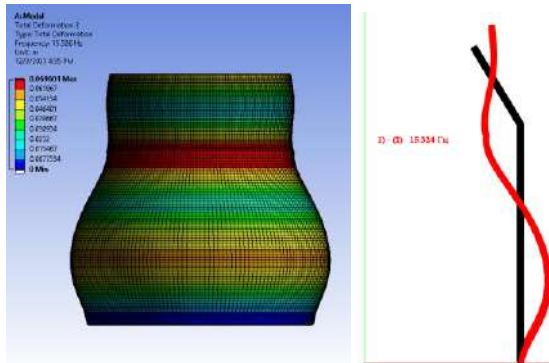


Рис.5 – вторая осесимметричная форма колебаний

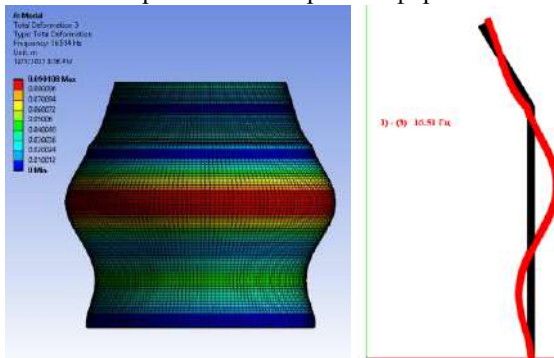


Рис.6 – третья осесимметричная форма колебаний

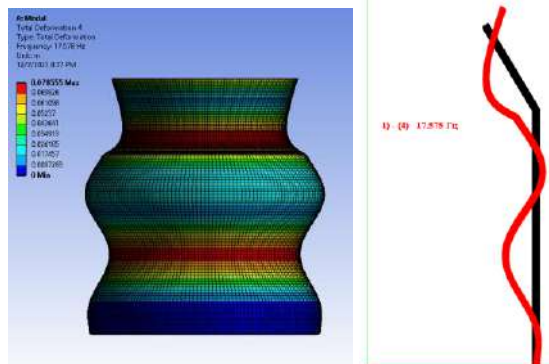


Рис.7 – четвертая осесимметричная форма колебаний

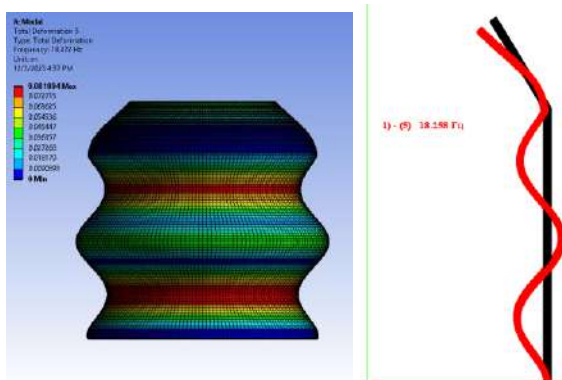


Рис.8 – пятая осесимметричная форма колебаний

Получены геометрически нелинейные дифференциальные уравнения статического и динамического деформирования осесимметричной оболочки вращения. Уравнения внедрены в программу DARSYS. Проведены расчеты тестовых задач, показана сходимость с ANSYS для статического геометрически нелинейного деформирования и при расчете собственных колебаний.

Литература:

1. Применение глобальных координат в модели составной осесимметричной оболочки при анализе ее статического и динамического поведения / В. Е. Левин, А. Н. Пель, Д. А. Красноруцкий, П. З. Алюкаев // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2013. – № 4(53). - С. 114-123.
2. Нгуен М. Расчет осесимметричных оболочек вращения по дифференциальной модели / М. Нгуен, Д. А. Красноруцкий ; науч. рук. Н. В. Пустовой. – Текст : непосредственный // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 16 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г. : в 11 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – Ч. 11. – С. 40–44.
3. Красноруцкий Д. А., Лакиза П.А., Шелевая Д.Р. Программный комплекс для моделирования механики системы тонких упругих стержней // Краевые задачи и математическое моделирование: Тематический сборник научных статей / Под общей редакцией Е.А. Вячкиной. – Новокузнецк: Кузбасский гуманитарно-педагогический институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет», 2023. – С. 57-60.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Е.Д. Николаева

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Кожевников А.Н., к.т.н., доцент

В работе представлено сравнение частот собственных колебаний экспериментальной модели опоры воздушной линии электропередачи, полученных экспериментальным методом и с помощью метода конечных элементов в пакетах SolidWorks и ANSYS Workbench. Описаны этапы построения расчетной модели. Проведен анализ полученных результатов и сделаны выводы о возможности применения представленных методов.

The paper presents a comparison of eigenfrequencies of experimental model of power transmission line pylon obtained by the experimental method and using the finite element method in SolidWorks and ANSYS Workbench packages. The stages of construction of the calculation model are described. An analysis of the results obtained and conclusions about the possibility of applying the presented ones were made.

Балочные конструкции используются в различных областях инженерии и строительства для обеспечения необходимой прочности. На сегодняшний день задачи о собственных колебаниях конструкций решаются методом конечного элемента в различных пакетах. В данной работе представлено сравнение результатов рассмотрения задачи о собственных колебаниях конструкции, полученных в ходе эксперимента и при решении объёмными конечными элементами в пакетах SolidWorks и ANSYS Workbench.

Конструкция представляет собой квадратную трубу с двумя траверсами и кронштейном для крепления оттяжек. Материал конструкции сталь 3 полуспокойная. Высота трубы составляет 5860 мм.

При установке модели в конструкцию опорного узла были введены страховочные шпильки, допускающие свободные покачивания конструкции, что в некоторой степени моделирует поведение реальной конструкции без фиксации в опорном стакане.

Экспериментальное определение частот собственных колебаний выполнялось с применением измерительного комплекса «ЛЭПТОН-1», основанного на записи перемещений конструкции с последующей обработкой сигнала алгоритмом быстрого преобразования Фурье (БПФ).

На рисунке 2 (слева) представлена модель в пакете SolidWorks. На рисунке 2 (справа) приведен укрупненный узел крепления оттяжек.



Рис.1 – общий вид многогранной экспериментальной модели

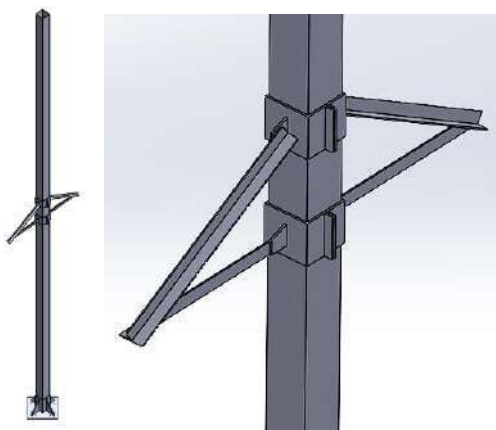


Рис.2 – общий вид модели конструкции (слева) и укрупненный узел крепления (справа)

Закрепление экспериментальной модели реализовывалось с помощью 8 болтов в основании. В расчётной модели так же было принято решение реализовать крепление в соответствующих отверстиях в основании (рисунок 3).

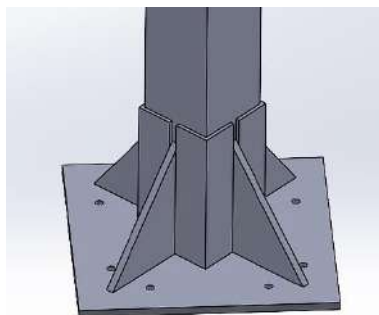


Рис.3 – модель основания экспериментальной модели

Данная модель была использована для расчётов собственных частот как в пакете SolidWorks, так и для ANSYS Workbench [1, 2]. Предварительно определялись оптимальные параметры разбиения и вычислялись низшие частоты изгибных и крутильных колебаний.

В таблице 1 представлено сравнение полученных результатов.

Таблица 1 – Сравнение собственных частот

Номер частоты	Экспериментально полученные частоты f , Гц	Частоты, полученные в пакете ANSYS Workbench, Гц	Частоты, полученные в пакете SolidWorks, Гц
1	3,058	3,418	3,409
2	3,058	3,435	3,413
3	18,880	18,977	19,697
4	18,886	18,995	19,716
5	53,396	56,773	57,823

В результате исследования можно сравнить собственные частоты, полученные моделированием конструкции в пакетах с экспериментально полученными значениями. Отличие между полученными значениями частот в пакете SolidWorks с экспериментально полученными значениями составляет не более 11,59%. Погрешность полученных значений частот в пакете ANSYS Workbench с экспериментально полученными значениями составляет не более 12,32%.

Однако качественный результат в более высоких расчетных значениях частот является закономерным в силу более жесткой

вариационной постановки задачи при решении методом конечного элемента.

Такие большие различия наблюдаются у первых двух частот [3]. Это может быть обусловлено разбиением моделей на малое количество элементов в силу особенностей моделирования тонкостенных труб: необходимо одновременно добиться количества элементов по толщине стенки и по длине конструкции. Возможным решением выявленной проблемы является упрощение модели для дальнейших исследований.

Литература:

1. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний. – 2е изд. – М.: Наука, 1964. – 440 с.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний. – 2е изд. – М.: Наука, 1965. – 551 с.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 472 с.

УМЕНЬШЕНИЕ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ ОПОРНЫХ РАМ РАДИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

К.В. Поддубная

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, poddubnaya.k64@gmail.com**

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

В современной промышленности ключевым аспектом при разработке и производстве конструкций является рациональное использование материалов. Уменьшение металлоемкости становится все более актуальной задачей для многих отраслей. В рамках данного исследования предложена методика определения топологии опорных рам радиальных вентиляторов среднего давления с целью достижения требуемых прочностных и динамических характеристик при минимальной металлоемкости. Работа представляет комплекс задач, включая расчет напряженно-деформированного состояния исходной опорной рамы на статическую прочность, модальный анализ для определения динамических характеристик, а также разработку модификаций конструкции с целью улучшения динамических характеристик.

In contemporary industry, a pivotal aspect in the development and production of structures is the rational utilization of materials. The reduction of material intensity is becoming an increasingly pressing challenge across various sectors. This study proposes a methodology for determining the topology of support frames for medium-pressure radial fans to achieve the required strength and dynamic characteristics with

minimal material intensity. The research encompasses a set of tasks, including the calculation of the stress-strain state of the original support frame for static strength, modal analysis for determining dynamic characteristics, and the development of structural modifications to enhance dynamic properties. The work provides a comprehensive approach towards efficiently reducing material intensity and improving the performance of radial fans, making a significant contribution to the field of rational materials science and engineering design.

1. Постановка задачи

Для анализа была предоставлена конструкторским бюро модель радиального вентилятора среднего давления серии «BP 280-46» № 4. Модель была построена в программном обеспечении SOLIDWORKS. Частота вращения рабочего колеса – 1500 об/мин. Конструкция радиального вентилятора изготовлена из материала – сталь 08ПС. Общий вес конструкции – 84 кг, из которых 52 составляет масса двигателя. В таблице 1 представлены габаритные размеры радиального вентилятора, а на рисунке 1 показано расположение данных размеров.

Таблица 1 – Габаритные размеры

Ширина вместе с корпусом (А вент), мм	720
Длина вместе с корпусом (В max), мм	770
Высота вместе с корпусом (Н), мм	815
Длина опорной рамы, мм	616
Ширина опорной рамы, мм	434

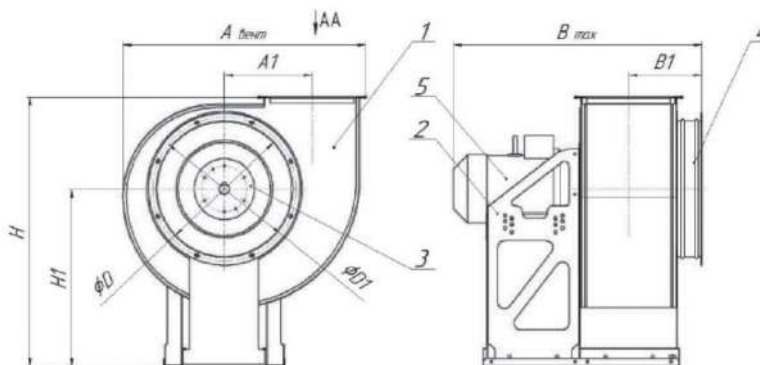


Рис.1 – размеры радиального вентилятора среднего давления

2. Алгоритм исследования напряженно-деформированного состояния исходной опорной рамы

Для расчета конструкции на статическую прочность использовался комплекс МКЭ ANSYS Workbench в модуле Static Structure. Для упрощения разбиения модели вентилятора на конечные элементы, за исключением двигателя, использовалась функция Midsurface, которая заменяет объемное тело двумерной оболочкой. В блоке Connections между элементами задавался контакт с трением – Frictional. Коэффициент трения был взят 0,2 для стали. Вместо 3D-болтов использовались балочные болты [4], так как конструкция является тонкостенной и объемные тела могут повысить вычислительную сложность. Ограничение перемещений осуществлялось по нижней части опорной рамы через функцию Fixed Support в 6 точках крепления (3 закрепления с каждой стороны). Скорость вращения рабочего колеса (157 рад/с) задавалось через Rotational Velocity.

Одним из методов, используемых для улучшения сходимости, является сгущение сетки, или увеличение количества узлов в зоне, где происходят значительные изменения решения [1, 2]. Главным предметом рассмотрения является опорная рама, поэтому размер конечного элемента для неё задавался через функцию Body Sizing. Было установлено, что оптимальными размерами конечного элемента, при которых значения напряжений будут иметь маленькую погрешность, для опорной рамы является – 0,004 м, для всей остальной конструкции – 0,008 м. Для элементов использовался метод Triangles.

3. Результаты численного моделирования

Результат статического расчета показал, что максимальные напряжения находятся в основаниях рамы и местах крепления электродвигателя к площадке под него. Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу находится около отверстия для нижнего крепления рамы и составляет 81,119 МПа. На рисунке 2 представлен результат статического расчета.

Конструкция в рабочем состоянии имеет подвижные компоненты, а именно вращения рабочего колеса, оценка динамических свойств конструкции становится важным аспектом. Если частота вращения вала будет близка к одной из собственных частот колебаний, это может привести повышенным вибрационным нагрузкам и преждевременному разрушению [3].

Модальный анализ проводился в модуле Modal с совмещением с модулем Static Structural. Между этими модулями создаются связи – Engineering Data, Geometry, Model и связь Solution-Setup. При исследовании рассматривались первые 5 тонов конструкции. На рисунке 3 представлены 2 тона. Значения собственных частот колебаний конструкции показаны в таблице 2.

К: Статика: исходная модель
 Equivalent Stress 2
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: Pa
 Time: 1 s
 20.05.2023 20:50

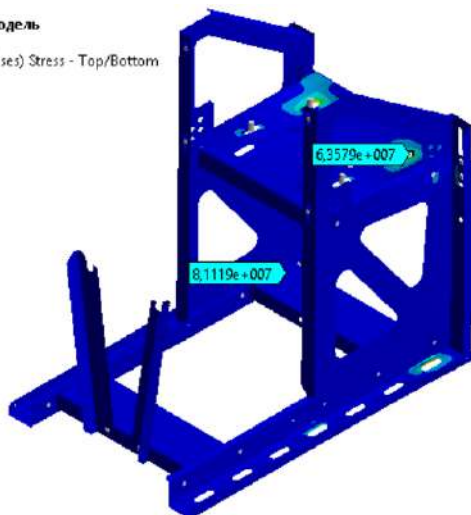
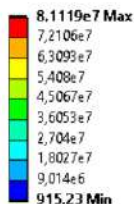
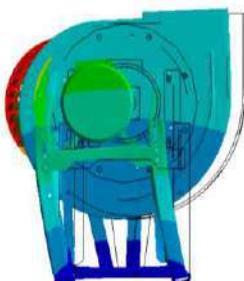
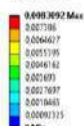


Рис. 2 – напряжения по Мизесу в исходной опорной раме

E: Modal
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Frequency: 12,95 Hz
 Unit: m
 20.05.2023 20:56



E: Modal
 Total Deformation 2
 Type: Total Deformation
 Frequency: 15,791 Hz
 Unit: m
 20.05.2023 20:57

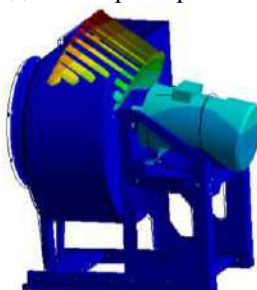


Рис. 3 – форма собственных колебаний № 1 и № 2

Таблица 2 – Значения частот собственных форм колебаний

Номер частоты	Значение частоты, Гц	Описание
1	12,950	боковые движения конструкции (в плоскости xz)
2	15,791	наклонное движение конструкции вперед-назад (в плоскости yz)
3	28,631	Боковые движения рабочего колеса в противофазе с остальной конструкцией
4	31,382	Наклонное движение рабочего колеса в противофазе с остальной конструкцией
5	47,401	Движение конструкции «вверх-вниз»

Результаты показали, что исходная модель опорной рамы радиального вентилятора удовлетворяет статическим прочностным характеристикам, так как значение максимального напряжения по Мизесу не превышает предела текучести. По результатам модального анализа динамики было установлено, что модель имеет два тона собственных колебаний с частотами ниже частоты возбуждающей силы (25 Гц), что может привести к повышенным вибрациям и преждевременному разрушению конструкции. Для отстройки конструкции от резонанса на частоте возбуждающей силы необходимо повысить жесткость конструкции.

Литература:

1. Бате К., Вилсон Е., Численные методы анализа и метод конечных элементов: пер. с англ. /под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. /под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Тимошенко С.П., Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
4. Чигаев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
5. Grzejda, R. Modeling bolted joints using a simplified bolt model//Journal of Mechanical and Transport engineering. – 2017. – N 69. – P. 29–37.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНОГО ТРОСА

Д.Е. Решетников

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Кожевников А.Н доцент, к.т.н.

Вопрос определения фактических характеристик растягиваемых элементов по их динамическим параметрам очень интересен. Рассмотрен ряд тестовых испытательных стендов, которые в будущем позволят отточить методику выявления параметров троса по экспериментально фиксируемым частотам. В данной работе была также рассмотрена возможность использования анализатора спектра частот колебаний ЛЭПТОН-1, для решения подобных задач.

The question of determining the actual characteristics of stretchable elements based on its dynamic parameters is very important. A number of test benches, which in the future will allow to hone the methodology for detecting the parameters of the cable by experimentally fixed frequencies, are considered. In this paper, the possibility of using the analyzer of the frequency spectrum of vibrations of the LAPTON-1, for solving such problems, was also considered.

Колеблющаяся натянутая струна является одной из первых физических систем, для которой применяются новые аналитические инструменты современной механики и математики. Именно поэтому при моделировании растягиваемых упругих элементов обращаются к струнной модели. Первые упоминания об исследовании подобной задачи представлены в трудах Brook Taylor, D'Alembert, Euler, Johann и Daniel Bernoulli в первой половине XVIII века [1].

Для определения параметров троса по его динамическим характеристикам был разработан испытательный стенд следующего вида (рис. 1). Натяжение создавалось с помощью талрепа (отмечен синей стрелкой). Усилие фиксировалось динамометром (красная стрелка). Диапазон рассмотренных усилий составил ряд значений 4, 10, 20, 24, 28, 32, 35 кгс. Крепление к силовому полу выглядит следующим образом (рис. 2). Длина троса в текущем эксперименте является искомой величиной во всем эксперименте, поскольку решается обратная задача: определение длины по известным усилию и частоте. Трос соответствует стандарту DIN 3035 [2], материал – углеродистая сталь, покрытая цинком, с органическим сердечником).



Рис. 1 – опорные точки троса

Талреп для создания усилия закреплен на монтажной стойке с помощью резьбового соединения, также можно увидеть расположение анализатора спектра частот колебаний конструкций (рис. 2).

Установка крепилась к силовому полу достаточной длинной опорной шпилькой и увеличение растягивающей нагрузки приводит к перемещениям точки закрепления, при этом данный эффект не приводил к ослаблению закрепления.

В силу того, что значения полученных частот в струнной модели обладают кратностью [3], из полученного набора экспериментальных данных отобраны значения близкие к кратным, но такое измерение оказалось единственным во всем массиве данных. Результаты представлены в таблице 1.



Рис. 2 – крепление троса к силовому полу

Таблица 1 — Значения кратных частот колебаний

Тяжение, кгс	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц	f_5 , Гц
28	3.011	6.123	9.436	12.348	15.660

На следующем этапе была проведена оценка изменения частоты при изменении растягивающего усилия по формуле

$$v_2 = v_1 \cdot \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad (1)$$

Дальнейшим этапом стало распространение выявленного кратного результата на имеющиеся уровни растягивающей нагрузки. В результате чего получены спектры частот собственных колебаний для троса при фиксируемых в эксперименте растягивающих усилиях (таблица 2).

Следующим шагом исследования стало выявление количества повторений каждой частоты в общем массиве данных. Указанная

статистика необходима для определения длины троса по значениям частот собственных колебаний системы (таблица 3).

По результатам работы на таком стенде можно сформулировать вывод о том, что наиболее часто регистрируемыми частотами являются вторая – четвертая. Это обусловлено приложением внешних разовых импульсов к тросу на расстоянии одной трети от правой опоры. В этом случае в спектре частот колебаний должна была возбуждаться именно третья частота, ведь именно за координату с пучностью этой формы происходило воздействие.

Таблица 2 — Значения получившийся частот колебаний

Тяжение, кгс	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц	f_5 , Гц
4	1.138	2.314	3.566	4.667	5.919
10	1.799	3.659	5.639	7.379	9.359
20	2.545	5.175	7.975	10.436	13.235
24	2.788	5.669	8.736	11.432	14.499
28	3.011	6.123	9.436	12.348	15.660
32	3.219	6.546	10.088	13.200	16.742
35	3.367	6.846	10.550	13.805	17.509

Таблица 3 — Определение длины троса

Тяжение, кгс	Частота минимальная, Гц	Длина, м	Частота средняя, Гц	Длина средняя, м
4	1.204	2.339	2.007	4.679
10	1.606	2.773	-	-
20	2.209	2.851	5.421	5.703
24	2.409	2.864	8.533	8.593
28	3.012	2.474	6.023	4.949
32	3.012	2.645	6.024	15.290
35	3.012	2.766	10.340	8.300

Полученные в результате расчетов длины троса являются существенно завышенными относительно реального расстояния между опорными точками троса: подпятники были расположены на расстоянии

порядка 5 метров с учетом всех связей. В связи с этим требует повысить качество экспериментальных данных: исключить из рассмотрения излишние или даже вредные (вносящие шумы и погрешности) элементы системы.

Литература:

1. SZABO, I. Geschichte der mechanischen Prinzipien. Birkhauser Verlag, Basel, 2nd edition, 197, 265 P.
2. EN 10385-4: Steel wire ropes - Safety - Part 4: Stranded ropes for general lifting applications; German version EN 12385-4:2002
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Москва: «Наука» - 1972. - 735 с.

МОДЕЛЬ ГРАДА ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ С РАЗРУШЕНИЕМ

В.Т. Ле

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, tualeviet86@gmail.com**

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

Оценка воздействия града является обязательным условием при расчетах безопасности самолетов. Град не является обычным конструкционным материалом, и проводятся эксперименты по воздействию льда. Разработана модель льда с разрушением и проведено сравнение расчетов с экспериментами.

Assessing the impact of hail is a mandatory condition in aircraft safety calculations. Hail is not a common structural material, and experiments on the impact of ice are conducted. A model of ice with failure has been developed, and comparisons of calculations with experiments have been conducted.

Опасения по поводу воздействия града на самолеты возникли после столкновений, причинивших значительный ущерб. Град представляет опасность для самолетов из-за разных размеров его частиц и скорости ударов [1]. Хотя град широко изучался, было предпринято лишь несколько попыток его численного моделирования при высоких скоростях деформации [2]. Попытки по использованию существующих моделей, в том числе для хрупких материалов, демонстрируют необходимость улучшения модели.

Представленная модель является феноменологической по своей природе. Параметры материала измерялись в экспериментах о воздействии льда при высоких скоростях деформации, которые были

независимы от тех, что использовались для проверки точности данной модели. Град может проявлять различные характеристики, варьирующиеся от пластичности до хрупкости, в зависимости от скорости деформации при сжатии (см. рис.1) [3]. Как и в случае разрушения при растяжении, прочность при сжатии зависит от размера зерна. Переход от пластичности к хрупкости происходит при скорости деформации порядка 10^{-3} c^{-1} при сжатии при температуре порядка -10° C . Шульсон (см. рис. 2) показывает резкое увеличение прочности при сжатии для поликристаллического льда с 0.5 МПа при скорости деформации 10^8 c^{-1} до 10 МПа при скорости деформации 10^{-3} c^{-1} , затем снижение до 6 МПа при скорости деформации 10^{-1} c^{-1} .

В этом исследовании реализация модели материала льда и симуляции на основе метода сглаженных частиц (SPH) была осуществлена с помощью программного обеспечения LS-DYNA. Данная модель реализована с использованием *MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION_EOS. В модели были добавлены две функции, их возможная реализация повысит точность расчетов. Первая функция сохраняет остаточную прочность после разрушения льда, вторая - вязкоупругий член на основе ряда Прони, добавляемый к напряжению.

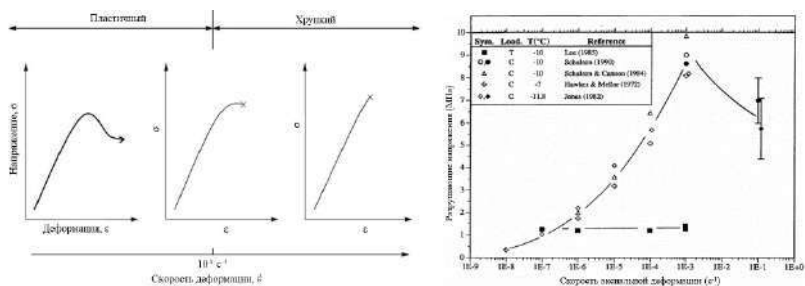


Рис.1 – а) Поведение льда при сжатии; б) прочность льда как функция скорости деформации [3]

Для уравнения состояния *EOS_TABULATED_COMPACTION нужны входные данные, описывающие связь между объемной деформацией и давлением в ледяном материале. Используется алгоритм *CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE с формулировкой SOFT 1 для контакта между целевой пластиной и объектами с разной жесткостью.

На рис. 2а показана смоделированная эволюция удара частицы льда о стальную пластину со скоростью 152,4 м/с, полученная в результате моделированного SPH. Сравнивая его с изображением из [4], приведенным на рис. 2б, можно сказать, что при попытке воспроизвести

ход моделирования были получены качественно эквивалентные результаты. На рис. 2а и 2б показано разрушение структуры льда из твердого в жидкий/порошковый состав по мере развития события удара.

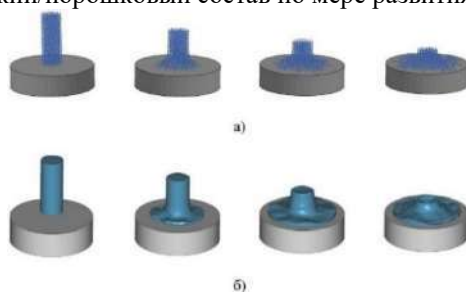


Рис.2 – численное моделирование удара частицы града о пластину
а - метод SPH; б - метод ALE (Arbitrary Lagrangian–Eulerian)

На рис. 3 показано изменение силы деформации дискретного пружинного элемента, представляющего собой тензометрический датчик, при моделировании методом SPH столкновения с ледяной частицей со скоростью 152,4 м/с. Проведено сравнение с аналитическими и экспериментальными результатами, полученными в [4]. Из графика видно, что изменение силы столкновения частиц льда, полученное с помощью метода SPH в данном исследовании, хорошо согласуется с результатами, полученными в [4].

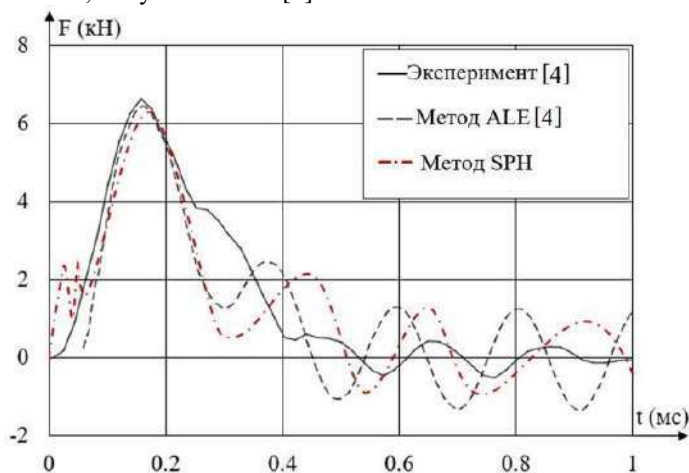


Рис.3 – изменение силы при ударе частицей льда о стальную пластину

Сравнение проводилось со скоростями соударения частиц льда со стальной пластиной: 91,44 м/с и 231,36 м/с. Результаты оказались в

хорошем согласии. Полученные результаты, качественно и количественно сопоставимые с результатами исследования в источнике [4], позволили сделать вывод о том, что подход SPH является подходящим и эффективным методом моделирования льда в LS-DYNA.

Была разработана модель льда и проведено сравнение ее расчетных результатов с экспериментами. Согласование между ними как количественно, так и качественно оказалось. Эта модель была успешно протестирована в различных условиях и тестовых установках.

Литература:

1. Alves M., Chaves C.E., Birch R.S. Impact on aircraft // 17th Int. Congr. Mech. Eng. São Paulo, 2003. P. 1–8.
2. Schulson E.M. Brittle failure of ice // Eng. Fract. Mech. 2001. Vol. 68, № 17–18. P. 1839–1887.
3. Schulson E.M., Iliescu D. Characterization of Ice for Return-to-Flight of the Space Shuttle. 2005. 77 p.
4. Carney K.S. et al. A phenomenological high strain rate model with failure for ice // Int. J. Solids Struct. 2006. Vol. 43, № 25–26. P. 7820–7839.

ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ВЕНТИЛЯТОРА

В.С. Уткина

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, vladautkina50@gmail.com**

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

Данное исследование направлено на изучение воздействия аэродинамических сил на напряженно-деформированное состояние рабочего колеса вентилятора. В работе рассматривается модель конструкции при различных нагрузках для определения влияния аэродинамических сил. С использованием вычислительных программ проводится расчет указанных сил и их воздействия на конструкцию рабочего колеса. Полученные результаты позволяют оценить влияние аэродинамических сил на напряжения и деформации в конструкции, что имеет важное значение для обеспечения безопасности и эффективности работы вентилятора.

This study aims to investigate the impact of aerodynamic forces on the stress and strain state of the fan impeller. The research examines the structural model under various loads to determine the effect of aerodynamic forces. Computational programs are employed to calculate these forces and their influence on the fan impeller structure.

The obtained results allow for the assessment of the impact of aerodynamic forces on the stress and deformation within the structure, which is crucial for ensuring the safety and efficiency of the fan's operation.

1. Постановка задачи

Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) была предоставлена расчетная модель радиального вентилятора среднего давления серии ВР 280-46 № 4. Модель была разработана в САД системе SOLIDWORKS. Частота вращения рабочего колеса составляет 1500 об/мин. Конструкция радиального вентилятора изготовлена из материала сталь 08Пс. В таблице 1 представлены геометрические характеристики рабочего колеса радиального вентилятора, а на рисунке 1 показана модель данного колеса [3].

2. Алгоритм исследования НДС рабочего колеса от аэродинамической и центробежной сил

Для расчета конструкции на прочность используется метод конечного элемента (МКЭ) в программе SOLIDWORKS. Для разбиения модели используются объемные элементы. Рабочее колесо было закреплено по внутреннему диаметру заднего диска и точка на переднем диаметре, а также закреплена каждая загнутая часть лопатки, соединенной с диском. Скорость рабочего колеса составляет 1500 об/мин.

Таблица 1 – Геометрические характеристики

Толщина переднего диска, мм	2,5
Толщина заднего диска, мм	
Внешний диаметр переднего диска, мм	410
Внешний диаметр заднего диска, мм	
Внутренний диаметр переднего диска, мм	324
Внутренний диаметр заднего диска, мм	
Толщина лопатки, мм	1,2
Длина лопатки, мм	200
Радиус кривизны лопатки, мм	36
Длина загнутой части лопатки, мм	10

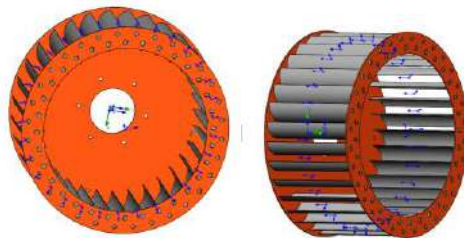


Рис. 1 – рабочее колесо вентилятора среднего давления

Одним из способов, используемых для улучшения сходимости, является сгущение сетки [2]. Для разбиения конструкции используются параболические тетраэдры. Предметом рассмотрения является рабочее колесо вентилятора среднего давления. В результате, при расчетах будем пользоваться сеткой, у которой минимальный размер элемента составляет 0,5 мм, а максимальный – 7 мм.

3. Результаты численного моделирования

Для определения аэродинамической силы, действующей на рабочее колесо вентилятора, необходимо по кривой вентилятора для данной модели определить максимальный КПД в рассматриваемых точках. Данная величина составила 5,273 Н [4,5]. Далее к полученной силе прикладывается центробежная нагрузка 1500 об/мин.

Проводилось два расчета: для центробежной нагрузки в первом случае и для центробежной и аэродинамической во втором [1]. Результат статического расчета показал, что максимальные напряжения находятся на сгибе лопатки у диска. Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу находится для всей конструкции. Напряжение для рабочего колеса при воздействии на него центробежной нагрузки составляем 120 МПа. После приложения аэродинамической силы на конструкцию напряжения составляют 155 МПа. На рисунке 2 представлен результат статического расчета.

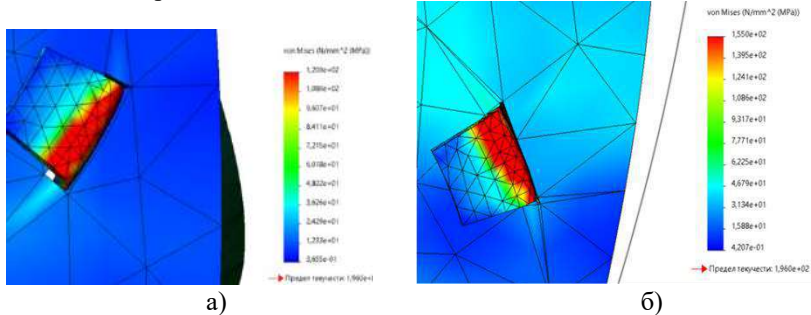


Рис. 2 – напряжения по Мизесу в рабочем колесе вентилятора при:
 а – центробежной нагрузке, б – при центробежной и аэродинамической нагрузке

Результаты показали, что рабочее колесо радиального вентилятора удовлетворяет статическим прочностным характеристикам, так как значение максимального напряжения по Мизесу не превышает предела текучести, которое для данного материала составляет 190 МПа. По результатам расчета было установлено, что влияние аэродинамической силы на НДС рабочего колеса вентилятора составляет 23%. Это означает,

что вклад данных сил в НДС рабочего колеса значителен и его необходимо учитывать при проведении расчетов.

Литература:

1. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. - М.: ДМК Пресс, 2018. - 288 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. /под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Зиновьев Д.В. Основы моделирования в SolidWorks: учебное пособие. – М.: Издательский дом Независимая фирма «Книга», 2014. – 240 с.
4. Раер Г. А. Динамика и прочность центробежных компрессорных машин. Л.: Машиностроение, 1982. 312 с.
5. Соломахова Т. С., Чебышева К. В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник — М.: Машиностроение, 1980. — 176 с, ил. 65 к.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИАЛЬНЫХ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О КОЛЕБАНИЯХ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО БАКА С ЖИДКОСТЬЮ

Д.Р. Шелевая^{1,2}, К.М. Нгуен¹

¹Новосибирский государственный технический университет,

**²Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск, krasnorutskiy@corp.nstu.ru**

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

В статье кратко описан алгоритм применения радиальных базисных функций (РБФ) для расчета совместных колебаний осесимметричного бака с жидкостью. С помощью интерполирующего многочлена, на основе полигармонической РБФ, генерируются весовые коэффициенты конечных разностей на произвольной нерегулярной сетке, имеющей сгущения в области контакта жидкости и стенок бака и разрежение внутри области. Алгоритм внедрен программный комплекс для расчета стержневых и оболочечных систем DARSYS.

The paper summarizes the algorithm of applying radial basis functions (RBFs) to calculate the coupled vibrations of an axisymmetric liquid tank. Using an interpolating polynomial, based on a polyharmonic RBF, finite difference weighting coefficients are generated on an arbitrary irregular grid having densities in the region of contact

between the liquid and the tank walls and sparsity inside the domain. The algorithm is implemented by the program package for calculation of rod and shell systems DARSYS.

Радиальные базисные функции (РБФ) [1-3] используются для построения интерполирующих многочленов, которые, в свою очередь, применяются для решения краевых задач для дифференциальных уравнений в разных областях математической физики. Можно выделить два основных направления использования РБФ:

1. Бессеточные методы. Линейные комбинации РБФ используются для аппроксимации разрешающих функций задачи. Неизвестными параметрами являются коэффициенты разложения разрешающих функций в ряды по РБФ. Первые определяются из решения СЛАУ, полученной после подстановки в дифференциальные уравнения и краевые/граничные условия соответствующих многочленов на основе РБФ.

2. Метод конечных разностей (МКР). Интерполяция по РБФ используется для вычисления локальных весовых коэффициентов для разностных трафаретов, аппроксимирующих дифференциальный оператор и краевые/граничные условия по соседним узловым точкам. При этом неизвестными, подлежащими определению, являются узловые значения разрешающих функций, как в обычном МКР. Такая разновидность МКР имеет название в англоязычной литературе Radial Basis Function Finite Difference method (RBF-FD).

В данной работе рассматривается второе из описанных выше направлений применения РБФ для расчета малых колебаний осесимметричного бака с идеальной несжимаемой жидкостью (рис.1). Для такой модели жидкости ее малые перемещения определяются потенциалом перемещений φ [4], а перемещения стенки бака определяются системой дифференциальных уравнений движения осесимметричной оболочки вращения, которые в сокращенном виде можно записать следующим образом:

$$\frac{dX}{ds} = F(s, X, \ddot{X}), \quad (1)$$

где $X(s, t) = \{U_r, U_z, \gamma, T_{2r}, T_{2z}, M_{2\varphi}\}^T$ – вектор разрешающих функций, s – естественная координата вдоль меридиана, U_r, U_z – проекции вектора перемещения точек меридиана \dot{U} в радиальном и вертикальном направлении соответственно, γ – угол поворота при деформировании; T_{2r}, T_{2z} – проекции погонного внутреннего усилия \bar{T}_2 ;

$M_{2\varphi}$ – проекция внутреннего погонного момента; точки обозначают дифференцирование по времени t .

В рассматриваемой задаче неизвестны перемещения оболочки и давление жидкости на ее стенки. Эти функции определяются в результате решения задачи о взаимодействии.

Потенциал перемещений на смоченной стенке определяет давление жидкости на эту стенку следующим образом:

$$p = -\rho_{жс} \varphi \omega^2, \quad (3)$$

где $\rho_{жс}$ – плотность жидкости, ω – частота собственных колебаний при представлении решения в виде $X(s, t) = X^A(s) \exp(i\omega t)$.

В рамках допущений для потенциала малых перемещений жидкости φ получим краевую задачу [4]:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= 0 \text{ в объеме жидкости,} \\ \varphi &= 0 \text{ на свободной поверхности жидкости,} \\ \partial \varphi / \partial n &= 0 \text{ на оси симметрии и/или неподвижной части бака,} \\ \bar{U} \cdot \bar{n} &= \partial \varphi / \partial n, \quad \bar{T}_2 \cdot \bar{n} = -\rho_{жс} \varphi \omega^2 \text{ на смоченной части оболочки,} \end{aligned}$$

(4)

где \bar{n} – внешняя нормаль.

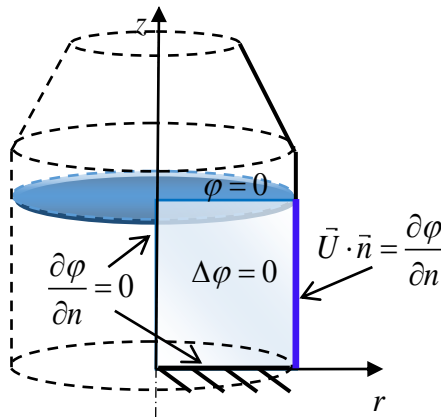


Рис.1 – расчетная схема бака с жидкостью

Для аппроксимации производной по координатам в уравнениях (1) применяется шаблон центральной разности, либо интерполяционный многочлен Лагранжа для повышения точности аппроксимации при

малом числе разбиений меридиана. Алгоритм решения уравнений (1), совместно с жидкостью (4) добавлен в функциональные возможности программы DARSYS [5].

Радиальная функция – это любая вещественная функция, значение которой зависит только от расстояния до начала координат $\phi(\mathbf{x}) = \phi(\|\mathbf{x}\|)$ или от расстояния между некоторой другой точкой, называемой центром: $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}\|)$. В качестве нормы обычно выступает евклидово расстояние. Существует много видов РБФ, наиболее часто используемыми являются:

мультикватричная [3]:

$$\phi(r) = \sqrt{1 + (\varepsilon r)^2}, \quad (5)$$

и полигармоническая [1-2]:

$$\phi(r) = r^{2m} \ln(r), \quad (6)$$

где ε – параметр формы, m – степень четной полигармонической РБФ.

Использование мультикватричной РБФ сопряжено необходимостью выбора параметра формы ε , зависящего от расположения узлов интерполяции. Выбор оптимального значения, минимизирующего ошибку аппроксимации, является дополнительной задачей, для решения которой в литературе предложены различные подходы. Полигармонические РБФ (6) не имеют параметра формы, однако есть некоторые умолчания практического применения, неосвещенные или недостаточно освещенные в литературе. В данной работе используются полигармонические РБФ (6).

На рис.2 приведены графики полигармонических РБФ (6) некоторых степеней m .

Тестовые расчеты задачи о колебаниях бака с жидкостью показали, что для использования (6) в качестве РБФ интерполирующего сплайна необходимо приводить нормирование размера трафарета чтобы избежать плохую обусловленность разрешающей матрицы, приводящую из-за ошибок округления чисел в ЭВМ к критическим ошибкам в определении весовых коэффициентов конечных разностей. Опытным путем, авторы установили, что «рабочей» областью полигармонической РБФ вида (6) является интервал для радиусов больше единицы. То есть необходимо нормировать координаты точек в трафарете таким образом, чтобы все расстояния между любыми точками были больше 1 (на практике можно установить число близкое к 1, например 1.01).

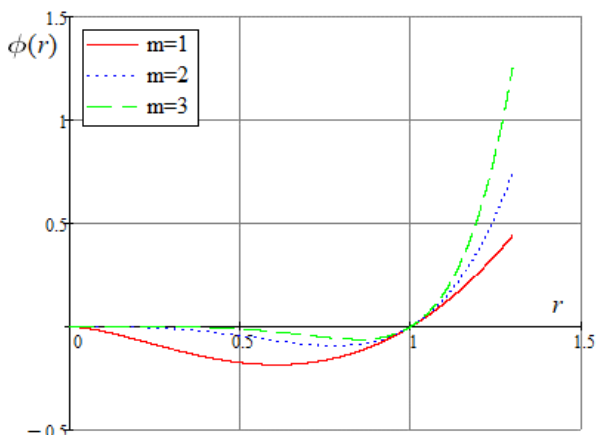


Рис.2 – полигармонические РБФ разных степеней

Классический метод конечных разностей предполагает разбиение геометрической области узлами, лежащими на координатных линиях (прямоугольная сетка). Для такого расположения узлов записываются простые и достаточно точные разностные схемы аппроксимации различных производных по координатам через узловые значения разыскиваемых функций. Использование РБФ позволяет вычислять весовые коэффициенты таких разложений на произвольной (нерегулярной) сетке, имеющей сгущение там, где это требуется (например, в области взаимодействия жидкости и оболочки), а в других местах иметь разреженную структуру для экономии ресурсов ЭВМ. Аналогичные нерегулярности с ортогональной сеткой можно добиться, используя деревья, но они имеют дополнительные трудности в реализации.

Быстрый алгоритм генерирования нерегулярной сетки узлов в прямоугольной области предложен в [6]. Этот алгоритм был слегка модифицирован для генерирования сетки из предварительно дискретизированной выпуклой граничной области с произвольной дискретизацией. Пример результата работы этого алгоритма приведен на рис.3.

На рис.3 кроме граничных и внутренних точек области показаны законтурные (вспомогательные) точки (в англ. ghost nodes). Эти точки вводятся для уравнивания числа уравнений и неизвестных. Таким образом уравнение $\Delta\varphi = 0$ должно выполняться во всех точках границы и внутренних точках области, а законтурные узлы участвуют в формировании трафаретов конечных разностей. Число законтурный

точек строго равно числу граничных точек, для которых заданы граничные условия (на зеркале жидкости, на оси симметрии, на смоченной части). На рис.3 приведен пример трафарета, составленного из 22 точек. Такие трафареты строятся для каждого узла контура и внутри области, и по ним вычисляются весовые коэффициенты конечных разностной аппроксимации требуемых производных.

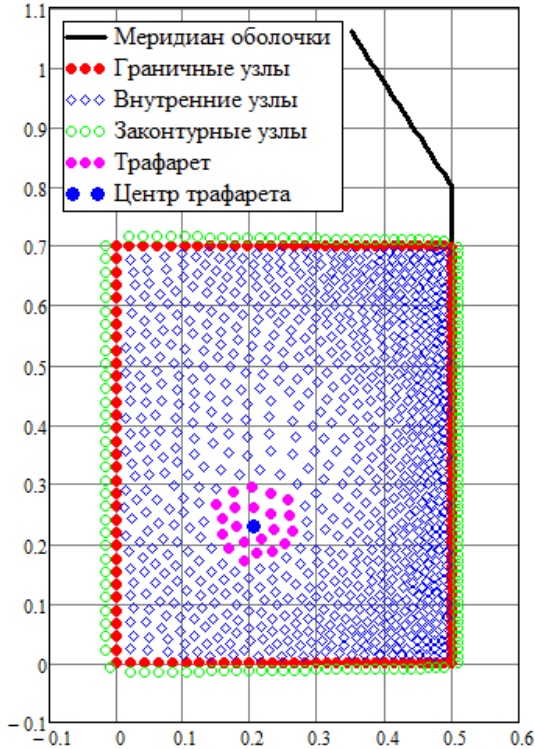


Рис.3 – разбиение расчетной области узлами

Рассмотрим алгоритм вычисления весовых коэффициентов для разностных схем. Интерполяционный сплайн на основе РБФ записывается в стандартном виде с дополнительным полиномом первой степени, гарантирующим уникальность решения [1], а также условиями ортогональности весовых коэффициентов следующим образом:

$$S(x, y) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \phi(x - x_k, y - y_k) + \gamma_1 + \gamma_2 x + \gamma_3 y, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = \sum_{k=1}^n \lambda_k x_k = \sum_{k=1}^n \lambda_k y_k = 0,$$

где (x_k, y_k) – узлы интерполяции, n – число узлов интерполяции, λ_k – весовые коэффициенты РБФ, $\gamma_{1,2,3}$ – коэффициенты дополнительного многочлена. Пусть интерполируемая функция имеет узловые значения f_k , тогда СЛАУ для определения весовых коэффициентов запишется следующим образом:

$$S(x_1, y_1) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \phi(x_1 - x_k, y_1 - y_k) + \gamma_1 + \gamma_2 x_1 + \gamma_3 y_1 = f_1$$

$$S(x_2, y_2) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \phi(x_2 - x_k, y_2 - y_k) + \gamma_1 + \gamma_2 x_2 + \gamma_3 y_2 = f_2$$

...

$$S(x_n, y_n) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \phi(x_n - x_k, y_n - y_k) + \gamma_1 + \gamma_2 x_n + \gamma_3 y_n = f_n$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 0$$

$$\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_n x_n = 0$$

$$\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2 + \dots + \lambda_n y_n = 0$$

или в матричном виде:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \phi(r_1 - r_1) & \phi(r_1 - r_2) & \dots & \phi(r_1 - r_n) & 1 & x_1 & y_1 \\ \phi(r_2 - r_1) & \phi(r_2 - r_2) & \dots & \phi(r_2 - r_n) & 1 & x_2 & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi(r_n - r_1) & \phi(r_n - r_2) & \dots & \phi(r_n - r_n) & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{[A]} \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

СЛАУ (8) имеет уникальное решение, если узлы интерполяции не повторяются (это условие должен обеспечить генератор распределения узлов), а её матрица $[A]$ не меняет свой вид при аппроксимации произвольного дифференциального оператора L , что легко показать. Пусть надо найти весовые коэффициенты w_j разложения по узловым значениям функции f_j дифференциального оператора L в центральной точке x_c, y_c трафарета из n узлов:

$$\sum_{j=1}^n w_j f_j + \left[w_{n+1} \sum_{j=1}^n \lambda_j + w_{n+2} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j + w_{n+3} \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \right] = L S(x, y) \Big|_{\substack{x=x_c \\ y=y_c}},$$

здесь в силу условия ортогональности (7), слагаемые в квадратных скобках равны нулю, то есть значимыми будут только n весов w_j . С учетом (7) и (8) имеем

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n w_j \left(\sum_{k=1}^n \lambda_k \phi(x_j - x_k, y_j - y_k) + \gamma_1 + \gamma_2 x_j + \gamma_3 y_j \right) + \\ & + w_{n+1} \sum_{j=1}^n \lambda_j + w_{n+2} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j + w_{n+3} \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j = L S(x, y) \Big|_{\substack{x=x_c \\ y=y_c}}, \\ & \sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{j=1}^n w_j \phi(x_j - x_k, y_j - y_k) + \gamma_1 \sum_{j=1}^n w_j + \gamma_2 \sum_{j=1}^n w_j x_j + \gamma_3 \sum_{j=1}^n w_j y_j + \\ & + w_{n+1} \sum_{k=1}^n \lambda_k + w_{n+2} \sum_{k=1}^n \lambda_k x_k + w_{n+3} \sum_{k=1}^n \lambda_k y_k = L S(x, y) \Big|_{\substack{x=x_c \\ y=y_c}}, \\ & \sum_{k=1}^n \lambda_k \left(\sum_{j=1}^n w_j \phi(x_j - x_k, y_j - y_k) + w_{n+1} + w_{n+2} x_k + w_{n+3} y_k \right) + \\ & + \gamma_1 \sum_{j=1}^n w_j + \gamma_2 \sum_{j=1}^n w_j x_j + \gamma_3 \sum_{j=1}^n w_j y_j = \\ & = \left(\sum_{k=1}^n \lambda_k L \phi(x - x_k, y - y_k) + \gamma_1 L 1 + \gamma_2 L x + \gamma_3 L y \right) \Big|_{\substack{x=x_c \\ y=y_c}}. \end{aligned}$$

В итоге, получим СЛАУ для определения весовых коэффициентов w_j разложения дифференциальной оператора по узловым значениям функции f_j , в которой матрица совпадает с (8):

$$[A] \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \\ w_{n+1} \\ w_{n+2} \\ w_{n+3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L \phi(x - x_1, y - y_1) \\ L \phi(x - x_2, y - y_2) \\ \dots \\ L \phi(x - x_n, y - y_n) \\ L 1 \\ L x \\ L y \end{Bmatrix} \Big|_{\substack{x=x_c \\ y=y_c}}. \quad (9)$$

На рис.4 приведен пример результатов расчета бака с водой, рассчитанный в DARSYS по представленному алгоритму (слева) и рассчитанный в программе Левина В.Е. [4] по методу конечных и граничных элементов (справа).

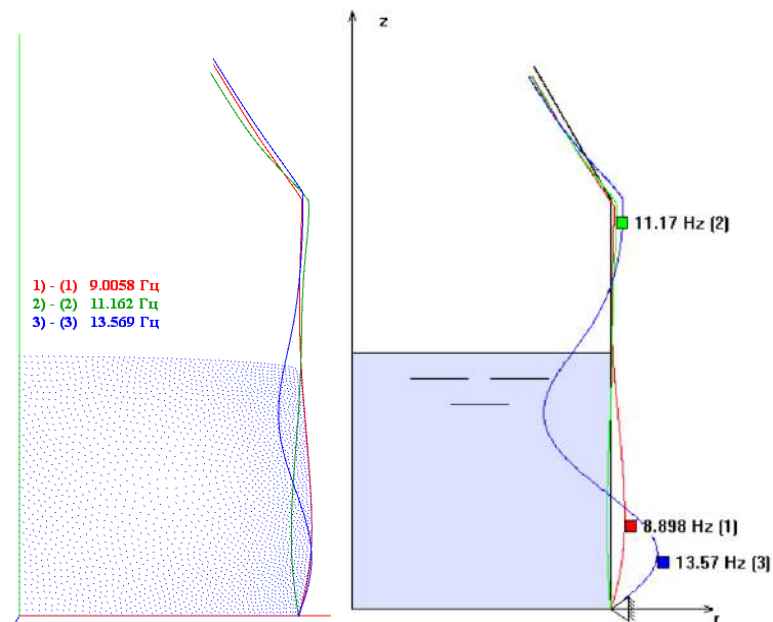


Рис.4 – пример расчета частот и форм малых колебаний бака с жидкостью (DARSYS слева, программа [4] справа)

Видно, что частоты и формы, рассчитанные разными методами, близки. Применение радиальных базисных функций для генерирования весовых коэффициентов позволяет использовать произвольную нерегулярную сетку, которая имеет сгущения в области контакта жидкости и оболочки и разреженную область на удалении от границ. Для интерполяции характерного размера сетки узлов от границ внутрь области использовался многочлен (7), но в качестве РБФ использовалась $\phi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$, она более устойчива с вычислительной точки зрения, чем полигармоническая РБФ (6), однако не подходит для аппроксимации дифференциальных операторов рассмотренной задачи.

Предложенный подход к расчету совместных колебаний осесимметричной оболочки с жидкостью показал свою работоспособность и будет расширен до общего пространственного случая с произвольной геометрией оболочек. За пределами данной статьи оставлены в умолчаниях некоторые детали и алгоритмы, а также

исследование сходимости результатов и верификация с известными программами.

Литература:

1. Flyer, N., Fornberg, B., Bayona, V., & Barnett, G. A. (2016). On the role of polynomials in RBF-FD approximations: I. Interpolation and accuracy. *Journal of Computational Physics*, 321, 21–38. doi:10.1016/j.jcp.2016.05.026

2. Shankar V, Wright GB, Kirby RM, Fogelson AL. A Radial Basis Function (RBF)-Finite Difference (FD) Method for Diffusion and Reaction-Diffusion Equations on Surfaces. *J Sci Comput*. 2016 Jun 1;63(3):745-768. doi: 10.1007/s10915-014-9914-1.

3. Chein-Shan Liu, Dongjie Liu. Optimal shape parameter in the MQ-RBF by minimizing an energy gap functional, *Applied Mathematics Letters*, Vol. 86, 2018, pp. 157-165, <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.06.031>.

4. Левин В. Е. Метод конечных и граничных элементов в динамике конструкций летательных аппаратов: специальность 05.07.03 «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»: Диссертация на соискание доктора технических наук / Левин, В. Е.; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2001. – 341 с.

5. Красноруцкий Д. А., Лакиза П.А., Шелевая Д.Р. Программный комплекс для моделирования механики системы тонких упругих стержней // Краевые задачи и математическое моделирование: Тематический сборник научных статей / Под общей редакцией Е.А. Вячкиной. – Новокузнецк: Кузбасский гуманитарно-педагогический институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет», 2023. – С. 57-60.

6. Fornberg, B., Flyer, N., Fast generation of 2-D node distributions for mesh-free PDE discretizations, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 69, Issue 7, 2015, pp. 531-544 doi: 10.1016/j.camwa.2015.01.009.

Так как опоры освещения имеют сложные геометрические формы, вырезы и ослабления, на них располагаются дополнительные элементы сложной пространственной формы, то выполнить полноценное расчетное исследование не представляется возможным. В этом случае требуется использовать вместо расчетных ориентировочных значений другие величины – результаты статистической обработки.

При этом для упрощения идентификации предлагается размещать датчики на опоре неподвижно, но в отдельные записи фиксировать колебания конструкции при слабом импульсном воздействии в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По уровню амплитуд отдельных гармоник опоры станет возможным идентифицировать формы колебаний в двух направлениях [3].

Полученные значения частот собственных колебаний были статистически обработаны и получено общее медианное значение частоты собственных колебаний, которое проявляется наиболее часто – 16.72 Гц (поперек) и 22.19 Гц (вдоль) улицы Блюхера. Данные значения существенно превышают ожидаемые балочные частоты [4]. В связи с этим возникло предположение о том, что найденные выше частоты являются более высокими балочными тонами и не представляют интереса.

Одностоечные опоры подобной геометрии в практике имеют частоты безузловых форм колебаний не более пяти Герц, поэтому рассмотрим отдельные диапазоны частот шириной по пять Герц. Результаты такого интервального анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Медианные значения частот колебаний вдоль и поперёк оси нагружения

<i>Установка датчика</i>	<i>Интервалы частот, Гц</i>					
	<i>0-5</i>	<i>5-10</i>	<i>10-15</i>	<i>15-20</i>	<i>20-25</i>	<i>25-30</i>
<i>Вдоль оси нагружения</i>	0,301	0	13,703	17,568	23,040	26,854
<i>Поперёк оси нагружения</i>	1,405	0	13,352	17,167	23,190	26,001

По результатам выполненного анализа медианные частоты в продольном и поперечном направлениях достаточно близки, что позволяет считать эти частоты верными. Единственное расхождение наблюдается среди низших частот. Этот результат объясняется большей подверженностью первых форм колебаний к изменениям при накоплении повреждений [5].

Требуется набрать больший объем экспериментальных данных, что позволит повысить качество получаемого результата.

Литература:

1. Кожевников А. Н. Применение методов моделирования при определении динамических характеристик опор контактной сети городского транспорта = Modelling as approach to identify dynamic characteristics of public transport overhead line pylons / А. Н. Кожевников. - Текст : непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. - 2021. - № 12. - С. 192-194. - Работа выполнена: в рамках гранта, по итогам конкурса мэрии города Новосибирска на предоставление грантов в форме субсидий в сфере научной и инновационной деятельности.
2. Кожевников А. Н. Расчетно-экспериментальная оценка технического состояния опор контактной сети городского электрического транспорта = Public electrified transport overhead contact line pylons Technical state numerical-experimental assessment / А. Н. Кожевников, А. Штрайх, Е. Д. Николаева. - Текст : непосредственный // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности : 10 междунар. конф. школьников, студентов, аспирантов, Томск, 09–11 нояб. 2021 г. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. - С. 113-117.
3. Бурнышева Т. В. Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных дефектов = Methodology of overhead power transmission line pylons technical state assessment with typical exploitation faults accounted [Электронный ресурс] / Т. В. Бурнышева, А. Н. Кожевников // Инженерный журнал: наука и инновации = Engineering journal: science and innovation : электрон. журн. - 2021. – № 2 (110). – С. 2. - Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44818408>. - Загл. с экрана. - DOI: 10.18698/2308-6033-2021-2-2053.
4. Kozhevnikov A. Experimental Research of the Overhead Contact Line Pylons of Electrified Transport / A. Kozhevnikov, A. Shtrayh, T. Burnysheva. - DOI 10.1063/5.0109408. - Text : direct // AIP Conference Proceedings. - 2023. – Vol. 2507, iss. 1 : Dynamics of technical systems : 17 inter. scientific-technical conf., Rostov-on-Don, 9–11 Sept. 2021. – Art. 030006 (5 p.).
5. SZABO, I. Geschichte der mechanischen Prinzipien. Birkhauser Verlag, Basel, 2nd edition, 197, 265 P.

Секция ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И
СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛА

**ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ ГИПОДИНАМИИ
В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ НЕВЕСОМОСТИ ДЛЯ
РАЗРАБОТКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Е.В. Беляева¹, И.В. Хромова^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Сибирский государственный университет водного транспорта,

г. Новосибирск, хромова@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Хромова И. В., к.т.н., доцент

В работе представлен анализ влияния факторов космического полета на организм человека. Выполнены модельные исследования влияния гиподинамии в условиях длительной невесомости на работу кровеносной системы человека. Проведен анализ средств компенсации негативного воздействия и адаптации к условиям невесомости для усовершенствования и разработки индивидуальных систем жизнеобеспечения. В данной статье рассматриваются вопросы моделирования и расчета тепловых процессов в системе "Тело человека - Теплозащита - Окружающая среда" при низких температурах с учетом внутренних источников и теплопередачи между расчетными элементами и слоями. Это позволяет легко рассчитать массовый расход охлаждающей жидкости (крови) по расчетным элементам. Исследовано тепло, передаваемое с током теплоносителя между элементами расчета и слоями для тепловых процессов в системе "Организм человека - Окружающая среда".

The paper presents an analysis of the influence of space flight factors on the human body. Model studies of the effect of physical inactivity under conditions of prolonged weightlessness on the functioning of the human circulatory system have been carried out. An analysis of means of compensating for negative impacts and adapting to conditions of weightlessness was carried out to improve and develop individual life support systems. This article discusses the issues of modeling and calculation of thermal processes in the "Human Body - Thermal Protection - Environment" system at low temperatures, taking into account internal sources and heat transfer between design elements and layers. This allows you to easily calculate the mass flow of coolant (blood) using the calculated elements. The heat transferred with the coolant current between the calculation elements and layers for thermal processes in the "Human Body - Environment" system has been studied. Ultimately, this research will contribute to the work of specialists in the development of life support systems for aircraft.

Актуальной задачей в области безопасности космических полетов является разработка индивидуальных систем жизнеобеспечения, направленных на компенсацию нарушений в организме человека вызванных гиподинамией в условиях длительной невесомости.

Целью настоящей работы является исследование влияния факторов космического полета на системы организма человека, анализ существующих проблем при разработке современных средств компенсации гиподинамии в условиях длительной невесомости. Проведение модельных исследований влияния невесомости и гиподинамии на гидравлические характеристики кровеносной системы человека, а так же оценка эффективности средств компенсации негативного воздействия.

Методика расчета гидравлических характеристик состоит из трех этапов: расчет гидравлических сопротивлений участков сосудистого русла; расчет перепадов давлений в контуре кровеносной системы; расчет распределения крови по расчетным элементам (минутный объем крови (МОК) в % от общего количества циркулирующей крови). Методика учитывает особенности строения участков (диаметры, длины, количество сосудов и скорости движения в них), эффект вращения крови в аорте и крупных артериях, потери напора по длине участков и местные сопротивления, вызванных ответвлениями сосудов [5-6].

В работе проведено исследование влияния гиподинамии в условиях невесомости на распределение крови по потребителям (части тела). Выявлено существенное перераспределение крови между расчетными элементами по сравнению с нормой на Земле, в частности избыточное кровоснабжение головы и недостаточное – мышечной группы (руки и ноги). Потеря до 5 кг мышечной массы в следствие гиподинамии ведет к дополнительным ухудшениям показателей МОК (рис. 1).

Для моделирования компенсации негативного воздействия фактора гиподинамии в невесомости проведены модельные исследования влияния тренировок на различные группы мышц. Отдельно исследован фактор изменения мышечной массы (потеря, сохранение и набор), а так же влияние интенсивности проводимых тренировок. Установлено, что комплексные тренировки мышц рук, ног и туловища приводят к максимальной компенсации негативного воздействия гиподинамии в условиях длительной невесомости. В частности, наблюдается снижение расхода крови на голову, по сравнению с вариантом без компенсации, и приближение показателей к норме на Земле (рис. 2). Кроме того благоприятный эффект тренировок наблюдается при сохранении мышечной массы на уровне до полетной нормы на Земле.

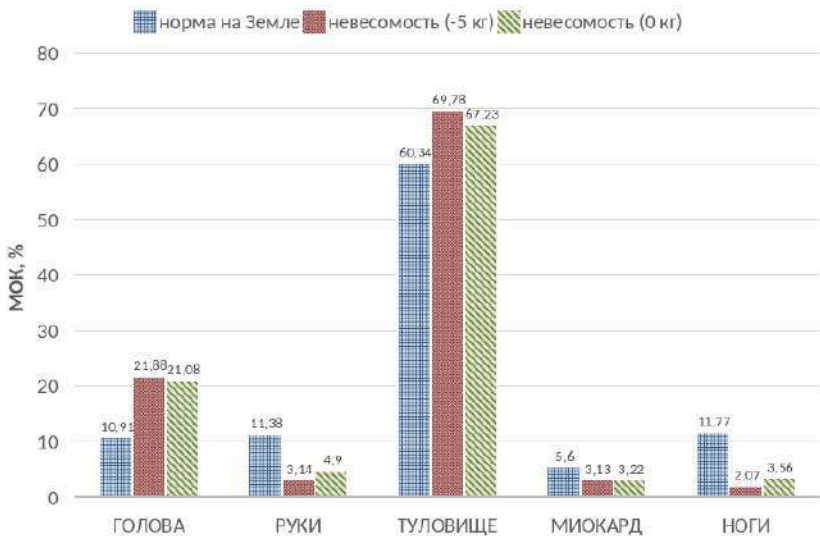


Рис. 1 – перераспределение крови по потребителям в невесомости с сохранением (0 кг) и потерей (5 кг) мышечной массы

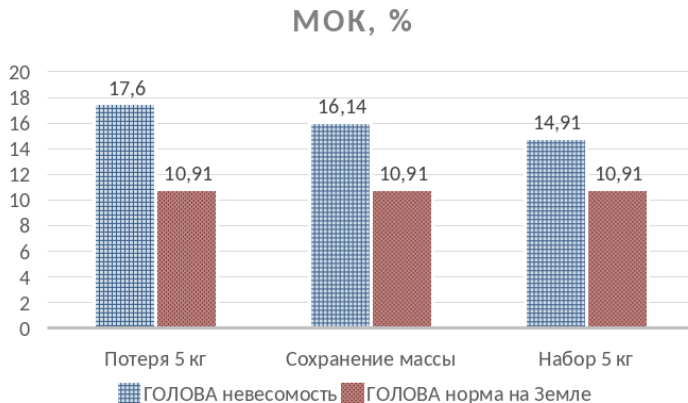


Рис. 2 – расход крови на голову при интенсивных тренировках в невесомости для случаев потери, сохранения и набора мышечной массы

Таким образом встает необходимость модернизации существующих программ тренировок и тренажеров путем добавления силовых нагрузок

к применяемым кардио-тренировкам. При этом необходимо предусмотреть их достаточную, но не изнуряющую интенсивность.

Анализ получаемых результатов позволяет качественно и количественно оценить уровень негативного воздействия гиподинамии в условиях длительной невесомости, а так же способы ее компенсации. Результаты исследований могут быть полезны специалистам при проектировании индивидуальных систем жизнеобеспечения космических летательных аппаратов, а так же специализированных тренажеров для программ реабилитации людей с ограниченными возможностями здоровья.

Литература:

1. Основы космической биологии и медицины. Том I. Космическое пространство как среда обитания. М.: Наука, 1975. - 450 с.

2. Основы космической биологии и медицины. Том II. Книга первая. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. М.: Наука, 1975. - 422 с.

3. Березовский В.А. Колотилев Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.

4. Пичулин В.С. Математическое моделирование и проектирование индивидуальных систем жизнеобеспечения экипажей космических аппаратов : Учеб. пособие. – М.: МАИ, 2001. – 88 с.

5. Чичиндаев А. В. 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»).

6. 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).

ВЛИЯНИЕ ТИПА ТЕПЛОВЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ В СУЖАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

К.В. Брызгалов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, bryzgalov.2002@mail.ru**

Научный руководитель: Сахнов А.Ю., к.ф.-м.н., доцент

В статье представлены результаты исследования течения воздуха в сужающемся канале при заданном постоянном тепловом потоке или заданной постоянной температуре стенки. Численное моделирование проводилось в пакете OpenFOAM с моделью турбулентности $k-\omega$ -SST. Результаты моделирования показали хорошее совпадение с экспериментальными данными. Увеличение температуры стенки приводит к возникновению эффекта прострела продольной скорости, подавлению турбулентности и снижению коэффициента трения и теплового числа Стантона.

The research presented results of simulation of flows in a confusor with constant heat flux or constant wall temperature. The simulation was performed in a free software OpenFOAM with the $k-\omega$ -SST turbulence model. The results of simulation are in a good agreement with the experimental data. The increase wall temperature leads to the velocity overshoot, full suppression of turbulence and to a decrease of skin-friction coefficient and thermal Stanton number.

Полевым методом измерений в работе [1] были получены профили скоростей и характеристик турбулентности в сечениях конфузорного канала. С целью изучить влияние тепловых граничных условий на характеристики пограничного слоя в течении с отрицательным градиентом давления было проведено моделирование условий вышеупомянутого эксперимента в пакете OpenFOAM [2]. В такой постановке задачи возможно развитие эффектов прострела скорости и ламинаризации пограничного слоя. Прострел – развитие максимума скорости внутри пограничного слоя при наличии продольного отрицательного градиента давления и значительного перепада плотности газа между стенкой и основным потоком [3].

Рассматривалось течение воздуха в плоском сужающемся канале с горячей нижней стенкой. Канал, представленный на рис. 1, имеет следующие геометрические параметры, которые соответствовали работе [1]: $L = 1.820$ м, $b = 0.150$ м, $\varphi = 2,5^\circ$, $h = 0.105$ м. Скорость и степень турбулентности во входном сечении конфузора составляли 2.266 м/с и ~2% соответственно. Температура набегающего потока, $T_0 = 293.15$ К. К нижней теплообменной стенки подводился различный постоянный тепловой поток $q_w = 1000, 3000, 6000$ Вт/м², или задавалась постоянная

температура стенки $T_w = 382, 632, 1251$ К. Моделирование проводилось на основе RANS подхода в пакете OpenFOAM [2] с применением решателя rhoPimpleFoam. Уравнения Навье-Стокса были дополнены k- ω SST моделью турбулентности. Все представленные в настоящей работе данные относятся к осевой плоскости канала при $z = 0$. Все результаты представлены для установившегося течения при $t > 0.6$ с.

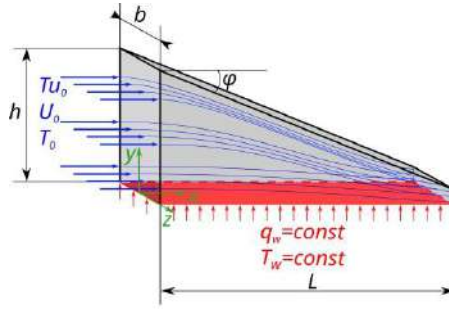


Рис. 1 – схема течения

На рис. 2 представлены результаты теста на сеточную сходимость и сравнение профилей продольной скорости с результатами эксперимента [1]. В качестве основной была выбрана средняя сетка: $1000 \times 100 \times 70$ со сжатием в 6 раз у нижней стенки канала.

На рис. 3а представлены профили продольной скорости в пограничном слое на нагретой стенке. Видно, что с увеличением температуры стенки и теплового потока через стенку профили становятся более заполненными и появляется максимум скорости внутри пограничного слоя. При сравнении максимальной скорости при различных типах граничных условий видно, что при одном и том же значении x/L , максимальное значение скорости выше в условиях постоянной температуры стенки. На рис. 3б приведены профили кинетической энергии турбулентности в ускоренном пограничном слое на нагретой стенке. Видно, что с увеличением теплового потока через стенку или температуры стенки максимальное значение кинетической энергии внутри пограничного слоя уменьшается. Нагрев стенки приводит к подавлению турбулентности. При этом в профилях кинетической энергии турбулентности появляется второй максимум. При различных типах граничных условий видно, что максимальное значение кинетической энергии турбулентности при постоянном тепловом потоке через стенку выше, чем при постоянной температуре стенки.

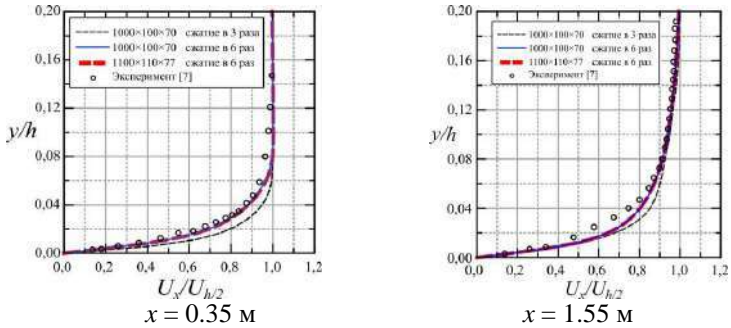


Рис. 2 – верификация модели: профили продольной скорости.

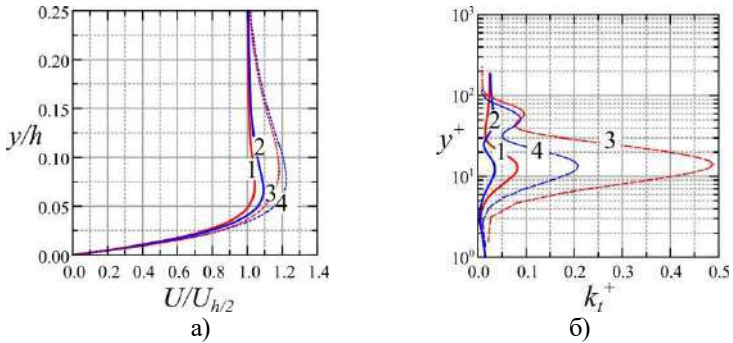


Рис. 3 – влияние нагрева стенки на профили скорости (а) и профили кинетической энергии турбулентности (б) в ускоренном пограничном слое на нагретой стенке; 1, 2 — течения при $q_w[\text{Вт}/\text{м}^2] = 6000$ и $T_w[\text{K}] = 1251$ в сечении $x/L = 0.464$; 3, 4 — течения при $q_w[\text{Вт}/\text{м}^2] = 6000$ и $T_w[\text{K}] = 1251$ в сечении $x/L = 0.962$.

На рис. 4а и рис. 4б представлены зависимости коэффициента трения и числа Стантона от безразмерной длины сужающегося канала при постоянном тепловом потоке через стенку (линии 1 – 3) и при постоянной температуре стенки (линии 4 – 6) соответственно.

Видно, что коэффициент трения снижается с увеличением теплового потока и температуры стенки. При максимальном из рассмотренных значений температур (линия 6а) коэффициент трения достаточно близок к зависимости коэффициента трения для ламинарного пограничного слоя (линия 9). Число Стантона в течении при $q_w = 1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (линия 1) хорошо совпадает с результатами эксперимента (значки 10). При

увеличении постоянной температуры стенки число Стантона также снижается как и при постоянном тепловом потоке.

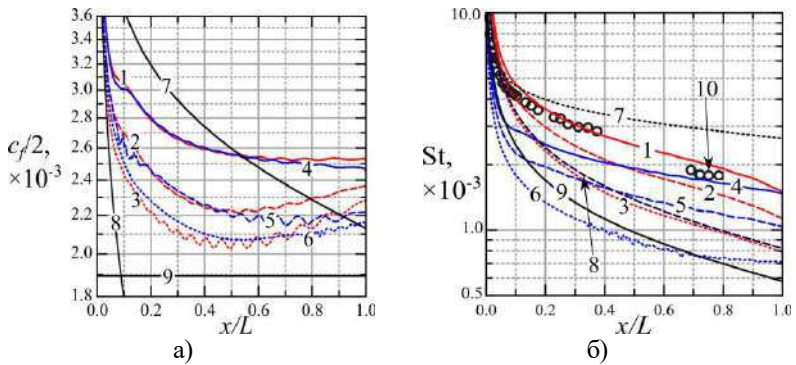


Рис.4 – влияние нагрева стенки на коэффициент трения (а) и тепловое число Стантона (б) в ускоренном пограничном слое. 1 — 3: течения при $q_w[\text{Вт}/\text{м}^2] = 1000, 3000, 6000$ соответственно; 4 — 6: течения при $T_w[\text{К}] = 382, 628, 1251$; 7а — $cf/2 = 0.0296\text{Re}_x^{30.5}$ [4] ($\text{Re}_x = \rho h/2U_h/2x/\mu$), 8а — $cf/2 = 0.332\text{Re}_x^{-0.5}$ [4], 9а — $cf/2 = 1.14\text{K}^{0.5}$ [5], 7б — $0.0296\text{Re}_x^{-0.2}\text{Pr}^{-0.6}$ [4], 8б — $\text{St} = 0.47\text{Re}_x^{-0.5}\text{Pr}^{-2/3}$ [4], 9б — $\text{St} = 0.332\text{Re}_x^{-0.5}\text{Pr}^{-2/3}$ [4], 10б — эксперимент [1].

В ходе исследования были получены следующие результаты:

- значительное повышение температуры стенки сужающегося канала или теплового потока через неё приводит к возникновению максимума скорости внутри пограничного слоя, расположенного вблизи нагретой поверхности, что является следствием существенной разности плотности воздуха между стенкой и основным потоком и наличием продольного отрицательного градиента давления. При этом величина максимума скорости в течении с постоянной температурой стенки выше, чем в течении с постоянным тепловым потоком через стенку

- возникновение и развитие максимума продольной скорости внутри пограничного слоя вблизи нагретой стенки приводит к подавлению турбулентности в этой же области течения. Отличие в величине максимума скорости при различных типах тепловых граничных условий приводит к более значительному снижению кинетической энергии турбулентности в течении с постоянной температурой стенки;

- подавление турбулентности вблизи нагретой стенки приводит к снижению коэффициента трения и теплового числа Стантона. В

ускоренном течении даже при малом перепаде температур между стенкой и основным потоком тепловые граничные условия оказывают влияние на коэффициент трения.

Литература:

1. Шакиров Р.Р., Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Кинематическая структура течений и теплоотдача в плоских диффузорном и конфузорном каналах // Теплофизика и аэромеханика. – 2022. – Т. 29 №5 С. 799-805.
2. OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide, 2014. – 212 P.
3. Sakhnov A. Yu. Local Laminarization within the Mild Pressure Gradient Flow over the Heated Wall// International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 165, Part B.
4. Schlichting H., Gersten K. Boundary Layer Theory // 8th ed. Springer: Berlin. –2003.
5. Volchkov E.P., Makarov M.S., Sakhnov A.Yu. Boundary layer with asymptotic favourable pressure gradient // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53. – P. 2837 – 2843.

СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА

В.М. Григоревская¹, И.В. Хромова^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Сибирский государственный университет водного транспорта,

г. Новосибирск, khromova@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Хромова И. В., к.т.н., доцент

В работе приведено описание расчетной схемы и методики расчета тепловых процессов в системе терморегуляции человека. Проведено исследование влияния половозрастных характеристик и типа конституции на тепловые процессы в системе терморегуляции человека в широком диапазоне параметров окружающей среды. Выполнен анализ распределения среднemasовых температур и тепловых потерь расчетных элементов для оценки теплового комфорта при нахождении человека в данных условиях.

The article describes the design diagram and methodology for calculating thermal processes in the human thermoregulation system. A study was conducted of the influence of gender and age characteristics and types of constitution on thermal

processes in the human thermoregulation system under various environmental parameters. To assess thermal comfort when a person is in these conditions, an analysis of the distribution of average mass temperatures and heat loss of calculated indicators was carried out.

Одной из актуальных задач в области разработки и оптимизации современных систем жизнеобеспечения, направленных на обеспечение теплового комфорта человека, является разработка физико-математических моделей, в частности процессов теплообмена в системе терморегуляции человека. Данный подход позволяет проводить комплексные исследования для определения границ проводимых экспериментов и создавать модельные тренажеры для отработки экстремальных ситуаций, связанных с переохлаждением и перегревом человека.

Целью настоящей работы является проведение модельных исследования влияния половозрастных характеристик и типа конституции на тепловые процессы в системе терморегуляции человека в широком диапазоне параметров окружающей среды.

В данной работе для моделирования работы системы терморегуляции человека применяется подход относительного деления объекта на «оболочку» – покровные ткани тела и «ядро» – внутренние органы и мышцы [6-8]. 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 и между расчетными элементами (рис. 1).

Данная методика позволяет определять локальные теплофизические параметры системы в широком диапазоне свойств окружающей среды с учетом переменных теплофизических свойств расчетных элементов и слоев, мощности внутренних источников тепла (метаболизм и теплопродукция мышц), половозрастных характеристик и типа конституции человека.

Проведенные исследования показали, что пол и возраст человека значительно влияет на величину тепловых потерь при нахождении в неблагоприятных температурных условиях (рис. 2).

Отдельное исследовано влияние типа конституции в зависимости от процента жировой ткани в организме на тепловые процессы в системе терморегуляции. Установлено, что небольшое (в пределах 5-7 %) повышение работает на увеличение термического сопротивления слоя изоляции (оболочки). Дальнейший рост процента жировой ткани не является эффективным с точки зрения термической изоляции.

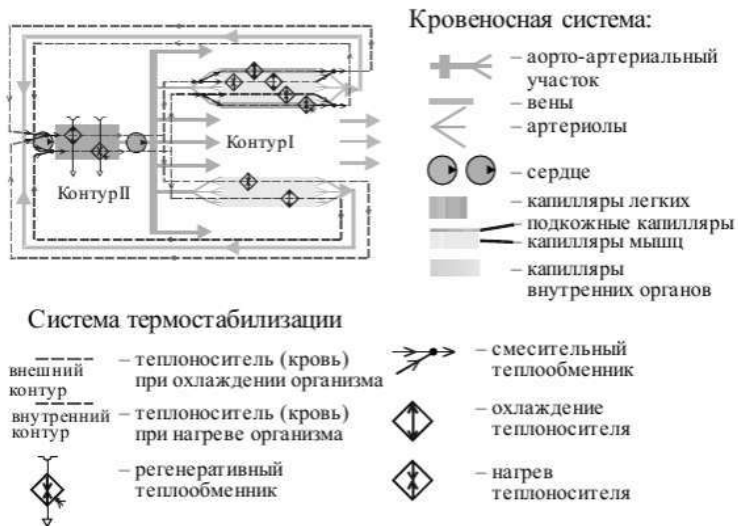


Рис. 1 – схема совместной работы кровеносной системы и системы терморегуляции человека

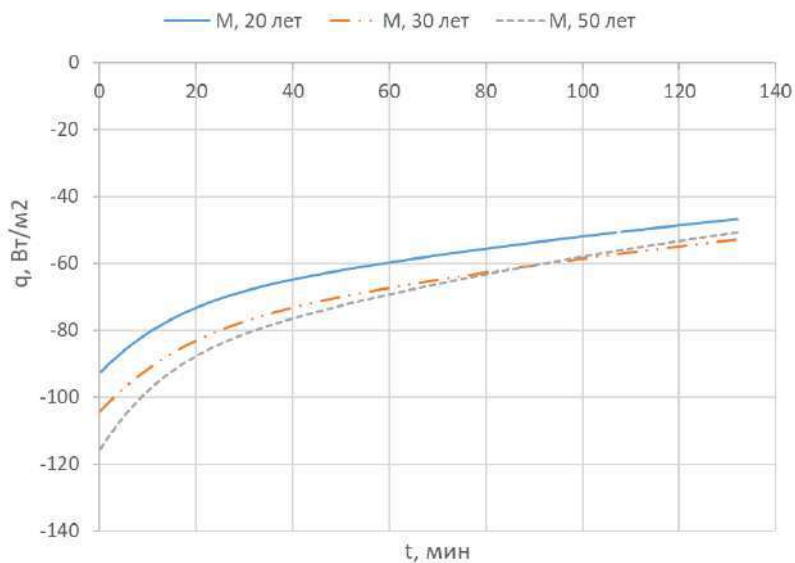


Рис. 2 – тепловые потери руки в зависимости от возрастных характеристик (воздух; $t_{\text{окр.ср.}} = -10^{\circ}\text{C}$)

Анализ результатов позволяет проводить оценку теплового комфорта человека при проектировании индивидуальных систем жизнеобеспечения летательных аппаратов: высотно-компенсирующих костюмов летчиков, костюмов постоянного ношения для космонавтов, а также при совершенствовании элементов систем охлаждения скафандров. Кроме того, результаты исследований могут быть полезны при разработке специализированной одежды для работы в неблагоприятных климатических условиях горнодобывающей промышленности, при обслуживании инфраструктуры железнодорожного транспорта и портов Северного морского пути РФ; спортивной одежды, термобелья для людей с ограниченными возможностями физического здоровья, специализированных костюмов пожарных,

Литература:

1. Ережеп Д. Анализ влияния одежды в процедуре криотерапии с использованием компьютерного моделирования / Д. Ережеп, А. Ю. Баранов // Вестник МАХ. – 2019. – № 4. – С. 84–91.
2. Березовский В.А. Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
3. Клинецвич Г.Н. Поражения холодом. – Л.: 1973. – 215 с.
4. Авхименко М.М. Холодовая травма: неотложная медицинская помощь, профилактика – Медицинская сестра. – 2014. – № 1. – С. 33-39.
5. Афанасьева Р.Ф. Холод. Критерии оценки и прогнозирование риска охлаждения / Р. Ф. Афанасьева, О. Б. Бурмистрова, А. Ф. Бобров // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – № 3 (49). – С. 13–18.
6. 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).
7. Khromova I. V. Heat Exchange in “Human body – Thermal protection – Environment System,” – Journal of Physics: Conference Series, 2017. – doi:10.1088/1742-6596/891/1/012084.
8. Чичиндаев А. В. 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»).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ВОДНО-ЭТАНОЛОВОГО РАСТВОРА НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЕ АЛЮМИНИЯ

А.И. Сюзаев, Д.В. Гусаченко, М.В. Горбачев
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, alekseysyuzaeв@mail.ru
Научный руководитель: Горбачев М.В., к.т.н., доцент

Развитие технологий требует поиска новых способов отвода теплоты, одним из которых является омывание модифицированной поверхности теплообменного аппарата рабочей жидкостью с последующим её испарением. В работе проведены эксперименты по испарению водно-этаноловой смеси в условиях свободной конвекции. В результате получена зависимость температур различных модификаций пластины от температуры рабочей жидкости.

The development of technologies requires the search for new ways of heat removal, one of which is washing the modified surface of the heat exchanger with working fluid and its subsequent evaporation. Experiments on evaporation of water-ethanol mixture under conditions of free convection have been carried out in this work. As a result, the temperature dependence of various plate modifications on the temperature of the working fluid was obtained.

Вследствие развития современных технологий был взят курс на уменьшение массогабаритных параметров изделий и увеличения производительности, что привело к увеличению плотности энергии и увеличению удельных тепловых потоков. В связи с этим использование традиционных устройств рассеивания и отвода теплоты является недостаточным. Для этого в настоящее время ведутся работы по поиску новых материалов и способов их обработки, улучшающих тепловых характеристики. Ведутся работы по созданию и расчёту новых пространственных конфигураций теплообменников, ведущих к увеличению их КПД. Одним из способов увеличения эффективности охлаждения является использование модифицированных поверхностей, омывание которых рабочей жидкостью с последующим её испарением приводит к интенсификации теплообмена на границе сред и к увеличению тепловой эффективности теплообменника в целом [1, 2].

В настоящей работе проводились исследования по испарению водно-этаноловых растворов с вертикально расположенной пластины алюминия в условиях свободной конвекции. На поверхности пластины посредством фемтосекундного лазерного излучения были созданы три параллельных друг другу модифицированных областей различных по

глубине, которые представляют собой группы продольных капилляров в виде массива открытых микро-каналов.

В ходе экспериментов пластина погружалась в жидкость известной температуры блока термостабилизации (Рисунок 1). По ходу измерения фиксировались параметры температур рабочей жидкости и пластины в различных точках по высоте модифицированной области с помощью АЦП и ПК до установления стационарного режима теплообмена. В результате были получены результаты по влиянию состава рабочей смеси на эффективность процесса охлаждения пластины. В дальнейшем планируется изучение влияния характерного размера полученной микроструктуры, на эффективность охлаждения теплообменной поверхности.

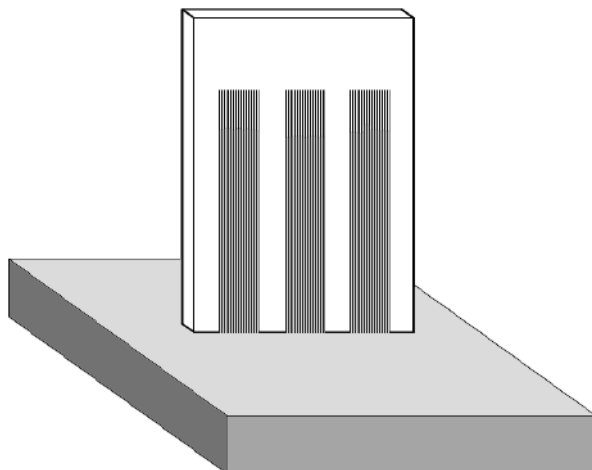


Рис. 1 – погруженная в жидкость пластина, имеющая модифицированные области

Литература:

1. Den Bouter J. A. D. L., De Munnik B., Heertjes P. M. Simultaneous heat and mass transfer in laminar free convection from a vertical plate // *Chemical Engineering Science*. – 1968. – Vol. 23, N 10. – P. 1185-1190.
2. Fang R. et al. Temperature effect on capillary flow dynamics in 1D array of open nanotextured microchannels produced by femtosecond laser on silicon // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10, N 4. – P. 796.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В СЛОЯХ НФЕ-7100 НА КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Д.Г. Чемичев^{1,2}, Д.А. Швецов^{1,2}, В.И. Жуков^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, danchemichev@yandex.ru

Исследования проводились на бронзовых капиллярно-пористых покрытиях с различными геометрическими характеристиками, созданных с помощью технологии 3D-печати методом селективного лазерного плавления/спекания SLM/SLS. Покрытия имели синусоидальный 2D-профиль, который отличался значениями длины волны синусоиды. В результате экспериментов выявлено, что на профиле 1 с длиной волны 1.75 мм в слое высотой 6 мм наблюдались более высокие коэффициенты теплоотдачи и критические тепловые потоки, чем на профиле 2 с длиной волны 3.5 мм. В слоях высотой ниже 6 мм на профиле 1 кризис осушения поверхности наступал при меньших тепловых потоках, чем на профиле 2.

The studies were carried out on bronze capillary-porous coatings with various geometric characteristics created using 3D printing technology by selective laser melting/sintering SLM/SLS. The coatings had a sinusoidal 2D profile, which differed in the values of the wavelength of the sine wave. As a result of experiments, it was revealed that higher heat transfer coefficients and critical heat fluxes were observed on profile 1 with a wavelength of 1.75 mm in a layer with a height of 6 mm than on profile 2 with a wavelength of 3.5 mm. In layers with a height below 6 mm on profile 1, the dryout occurred at lower heat fluxes than on profile 2.

Быстрое развитие технологий во многих отраслях предьявляет все более высокие требования к управлению тепловыми потоками. Кипение позволяет отводить достаточно большие плотности теплового потока при сравнительно малом перепаде температур между поверхностью и кипящей жидкостью. Применение режима кипения в тонких слоях жидкости позволяет уменьшить расход теплоносителя и снизить массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов. В ходе исследования использовались капиллярно-пористые покрытия с различными геометрическими характеристиками.

Модифицированные поверхности позволяют существенно интенсифицировать теплообмен при кипении жидкости за счёт увеличения числа действующих центров парообразования, а также разделения и упорядочивания потоков жидкость-пар [1, 2]. В последние годы благодаря развитию аддитивной технологии 3D-печати (селективное лазерное плавление/спекание SLM/SLS) появилась

возможность создания микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий с практически любой заданной формой. Основным преимуществом данного метода является простота изготовления сложных профилей покрытий без необходимости дальнейшей обработки [3]. Литер и Кавиани в работе [4] предложили механизм теплообмена для модифицированных покрытий. На рисунке 1 схематично представлен данный механизм. В исследовании [5] было показано, что более высокие значения коэффициента теплоотдачи достигались на 2D-модулированных покрытиях, выполненных в форме синусоиды, чем на 3D-структурах. В своей работе американские ученые [6] выяснили, что расстояние между ребрами стоит делать близкой к значению капиллярной постоянной. Эксперименты проводились в большом объеме, тем самым влияние высоты слоя на зависимость между межреберным расстоянием и капиллярной постоянной подробно не исследовалось.

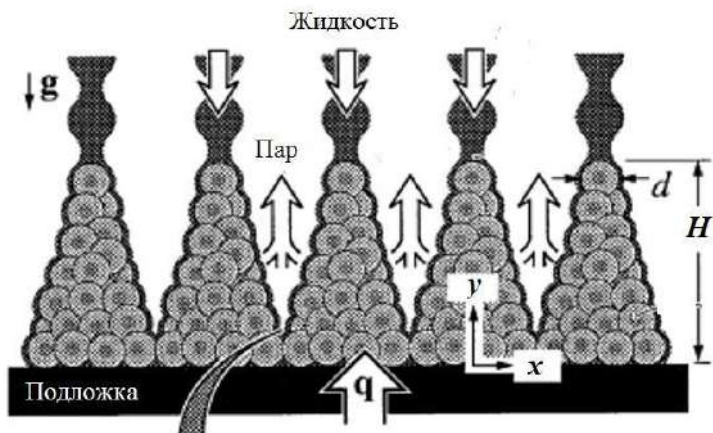


Рис. 1 - механизм разделения восходящих потоков пара и опускающихся потоков жидкости.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование теплообмена на капиллярно-пористых покрытиях с разной длиной волны модуляции: 1,75 и 3,5 мм соответственно. Покрытия наносились с использованием технологии 3-D лазерной печати [7]. Профили покрытий выполнены в форме синусоиды с различной длиной волны. В таблице 1 представлены основные параметры покрытий.

Таблица 1 – Параметры капиллярно-пористых покрытий

	<u>Профиль 1</u>	<u>Профиль 2</u>
Материал	Бронза AISI C836000	
Теплопроводность	$\lambda \approx 89 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [8]	
Пористость	$\varepsilon = 44 \%$	
Длина волны синусоиды	$\lambda_{m1} = 1,7 \text{ мм}$	$\lambda_{m2} = 3,5 \text{ мм}$
Максимальная высота	$\delta = 550 \text{ мкм}$	
Минимальная высота	$\delta_0 = 50 \text{ мкм}$	
Высота ребра синусоиды	$A = \delta - \delta_0 = 500 \text{ мкм}$	
Уравнение профиля	$z = (A/2) \cdot \sin(2\pi x/\lambda_m) + A/2 + \delta_0$	

Обозначения в таблице: z – вертикальная координата; x – горизонтальная координата.

Исследование проводилось на экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в [9]. Внутрь рабочей камеры заливался тонкий слой рабочей жидкости – HFE-7100. В работе проводились эксперименты в слоях жидкости 1.5 мм, 2.5 мм, 6 мм и 25 мм при давлениях 50 кПа, 100 кПа и 150 кПа, приведенное давление $P_s/P_{cr} = 2.2 \cdot 10^{-2}$, $4.5 \cdot 10^{-2}$, $6.8 \cdot 10^{-2}$ соответственно. В данной работе рассматривались случаи при давлении 100 кПа в слоях 1.5 мм, 2.5 мм, 6 мм. ($h/l_\sigma = 1.875$, 3.125 , 7.5 соответственно), где h – высота слоя жидкости, м; (h/l_σ) – безразмерная высота; $l_\sigma = \sqrt{\sigma/g(\rho_L - \rho_V)}$ – капиллярная постоянная, м; σ – поверхностное натяжение, Н/м; ρ_L , ρ_V – плотности жидкости и пара, соответственно, кг/м³; g – гравитационная постоянная, м/с². Значение коэффициента теплоотдачи рассчитывалось с использованием следующего выражения: $\alpha = q/(T_w - T_s)$, где q – плотность тепловой поток, Вт/м²; T_w – температура стенки, К; T_s – температура насыщения жидкости. Измерения тепловых потоков проводились одновременно с визуальными наблюдениями. Давление в рабочей камере измерялось деформационным датчиком вакуума и поддерживалось постоянным для каждого эксперимента. Для измерения плотности теплового потока в нижней части установки сбоку на различной высоте просверлено 5 отверстий диаметром 1.5 мм, в

которые вставляются медь–константановые термопары в нержавеющей капиллярах.

На рисунке 2 показано сравнение зависимостей плотности теплового потока от теплового напора, полученных для исследуемых поверхностей при различном давлении.

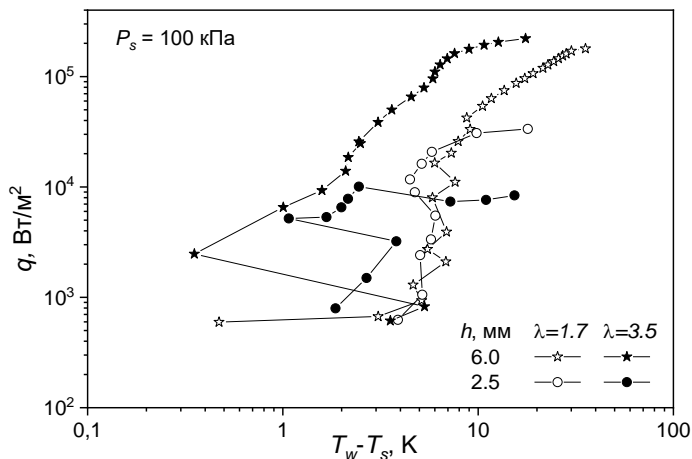


Рис. 2 - сравнение зависимостей плотности теплового потока от теплового напора при давлении $P_s = 100$ кПа

Экспериментально получено, что на покрытии с профилем 1 значения плотности теплового потока в слое высотой 6 мм выше, чем на покрытии с профилем 2. С уменьшением слоя менялся принцип закипания поверхности, так резкие скачки плотности теплового потока и температурного напора у профиля 1 обусловлены началом кипения «взрывным» образом, когда на поверхности возникает развитое пузырьковое кипение в течение короткого промежутка времени. Механизм, предложенный в [4], не отражает реальный процесс теплообмена при кипении в тонких слоях, что видно из рис. 2 по значению критического теплового потока. В слоях высотой меньше 6 мм на профиле 1 значения критических тепловых потоков ниже, чем на профиле 2.

Исследования выполнены за счёт средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00245).

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН Павленко А. Н. за вклад в постановку задачи исследования и обсуждение полученных результатов.

Литература:

1. Singh S.K., Sharma D. Review of pool and flow boiling heat transfer enhancement through surface modification // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* – 2021. – V. 181. – 122020.
2. Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Surface microstructures for boiling and evaporation enhancement in falling films of low-viscosity fluids // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* – 2020. – Vol. 155. – 119722.
3. Read N., Wang W., Essa K., Attallah M.M. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development // *Mater. Design.* – 2015. – V. 65. – P. 417–424.
4. Liler S.G., Kaviany M. Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2001. V. – Iss. 22. P. 4287–4311.
5. Min D.H., Hwang G.S., Usta Y., Cora O.N., Koc M., Kaviany M. 2-D and 3-D modulated porous coatings for enhanced pool boiling // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2009. – V. 52. – P. 2607–2613.
6. Maureen Winter, Justin A. Weibel The capillary length scale determines the influence of bubble-fin interactions and prediction of pool boiling from heat sinks // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 202 (2023) - 123727
7. Bessmeltsev V.P., Pavlenko A.N., Zhukov V.I. Development of a technology for creating structured capillary-porous coatings by means of 3D printing for intensification of heat transfer during boiling // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2019. – V. 55, № 6. – P. 554–563.
8. Osintsev O.E., Fedorov V.N. Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: Reference book. Moscow: Mechanical Engineering, 2004. – 336 p.
9. Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A. The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in horizontal liquid layers of various heights on a microstructured surface produced by 3D laser printing // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* – 2020. – V. 163. – 120488.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА КОСМОНАВТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ В СКАФАНДРЕ

Е.П. Чушкина¹, И.В. Хромова^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Сибирский государственный университет водного транспорта,

г. Новосибирск, khromova@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Хромова И. В., к.т.н., доцент

В настоящей работе представлены история создания и анализ существующих проблем при разработке современных автономных систем жизнеобеспечения скафандров. Выполнены модельные исследования тепловых процессов в системе терморегуляции человека при выполнении физической работы различной интенсивности в условиях нахождения на орбитальной станции и при внекорабельной деятельности. Проведен анализ влияния половозрастных характеристик на тепловые процессы в системе «человек – окружающая среда».

This paper presents the history of creation and analysis of existing problems in the development of modern autonomous life support systems of spacesuits. Model studies of thermal processes in the human thermoregulation system when performing physical work of varying intensity in conditions of being on the orbital station and during extravehicular activity have been performed. The analysis of the influence of gender and age characteristics on thermal processes in the "man – environment" system is carried out.

В настоящее время накоплен большой объем теоретических, экспериментальных и практических разработок в области систем жизнеобеспечения (АСЖО) скафандров и выполнении различных задач в условиях открытого космоса. Вместе с тем на практике существует ряд проблем, связанных с обеспечением теплового комфорта космонавта при выполнении физической работы в этих условиях.

Целью настоящей работы является анализ существующих проблем при разработке современных АСЖО скафандров, направленных на поддержание теплового комфорта космонавта при выполнении работ в открытом космосе. Проведение модельных исследований тепловых процессов в системе терморегуляции человека при выполнении физической работы различной интенсивности в условиях нахождения на орбитальной станции и внекорабельной деятельности.

Скафандры – это специальные костюмы, предназначенные для защиты человек от внешних воздействий окружающей среды. Развитие технологий привело к созданию более сложных и эффективных скафандров, но всё ещё существуют проблемы, связанные с их использованием, такие как ограниченность времени пребывания внутри

скафандра и маневренности, сложность обслуживания и высокая стоимость. Ещё одной серьёзной проблемой является необходимость обеспечения комфортных условий, в том числе и теплового комфорта, внутри скафандра [1, 2].

При проектировании и исследовании современных АСЖО большое распространение получило физико-математическое моделирование. Такие модели позволяют оценить тепловой комфорт человека, риски, связанные с переохлаждением и перегревом при работе в неблагоприятных или экстремальных температурных условиях, работоспособность и допустимые временные промежутки нахождения в данных условиях.

В данной работе для моделирования работы системы терморегуляции человека применяется 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 и между расчетными элементами. Предложенный подход позволяет рассчитывать среднemasовые температуры расчетных элементов и слоев и оценивать тепловые потери для различных условий внешней среды и мощности внутренних источников тепла, связанных с выполнением физической работы [5, 6].

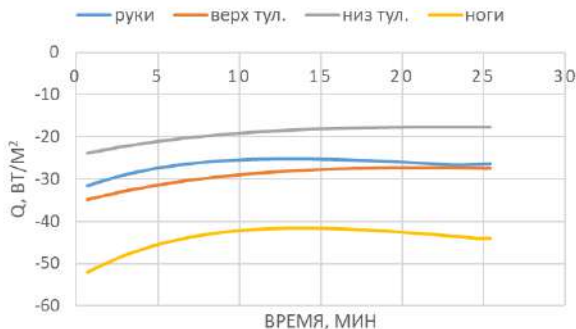


Рис. 1 – теплоотдача расчетных элементов

Проведенные исследования показали, что разные части тела остывают и перегреваются с разной скоростью. Интенсивность теплообмена зависит от массы расчетного элемента, количества тепла, поступающего с током крови и, в случае с грудной клеткой, наличия

ядра в виде легких, которые являются своего рода регенеративным теплообменником и осуществляют теплообмен с окружающей средой через дыхание (рис. 1).

Быстрое остывание рук и ног связано со снижением их кровоснабжения в связи с перераспределением крови между потребителями и гиподинамией в условиях невесомости (рис. 2). Кроме того, в невесомости пропорционально уменьшается расход крови на систему подкожных капилляров терморегуляции. Это в значительной степени снижает теплоотдачу через кожу и уменьшает эффективность системы охлаждения.



Рис. 2 – отклонение объемного расхода крови в невесомости от нормы на Земле

Анализ получаемых результатов позволяет качественно и количественно оценить уровень теплового комфорта человека и безопасное время нахождения в различных температурных условиях при выполнении работ различной интенсивности. Результаты исследований могут быть полезны специалистам при проектировании индивидуальных систем жизнеобеспечения.

Литература:

1. Абрамов И. П., Дудник М. Н., Сверщек В. И., Северин Г. И., Скут А. И., Стоклицкий А. Ю. Космические скафандры России. –М., 2005. – 360 с.: ил.
2. Крючков Б.И. Опыт создания и развития систем жизнеобеспечения экипажей пилотируемых космических аппаратов /

Б.И. Крючков, В.М. Усов // Пилотируемые полеты в космос 2017. № 4 (25). С.113–128

3. Катунцев В.П. Тепловое состояние космонавтов при автоматическом регулировании теплосъема в период внекорабельной деятельности с борта международной космической станции / В.П. Катунцев, С.Н. Филипенков // Медицина экстремальных ситуаций. – 2019. – № 21(2). – С. 300-309.

4. Пичулин В.С. Математическое моделирование и проектирование индивидуальных систем жизнеобеспечения экипажей космических аппаратов : Учеб. пособие. – М.: МАИ, 2001. – 88 с.

5. Чичиндаев А. В. 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»).

6. Khromova I. V. Heat Exchange in “Human body – Thermal protection – Environment System,” – Journal of Physics: Conference Series, 2017. – doi:10.1088/1742-6596/891/1/012084.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНОГО АППАРАТА

С.Д. Шабалов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 1999_serg@list.ru**

Научный руководитель: Горбачев М.В., к.т.н., доцент

В данной работе проводится численное моделирование теплообменного аппарата регенеративного типа. Разработана математическая модель, описывающая тепловые и гидродинамические процессы. Проводится ее верификация с известными данными.

In this paper, a numerical simulation of a regenerative type heat exchanger is carried out. A mathematical model describing thermal and hydrodynamic processes has been developed. Its verification with known data is carried out.

Введение

Теплообменными аппаратами регенеративного типа (ТАРТ) называют аппараты периодического действия. Они широко применяются в вентиляционных системах с целью регенерации вытяжного воздуха [1]. Это позволяет снижать тепловые потери в зданиях.

Наиболее эффективными материалами, из которого изготавливают данные аппараты, являются керамика и полимеры [2, 3].

Геометрическая модель регенератора

На рисунке 1 представлена геометрическая модель ТАРТ. Так как теплообменная секция представляет собой семейство повторяющихся каналов, то достаточно выделить один канал и рассмотреть процессы, протекающие в нем [4].

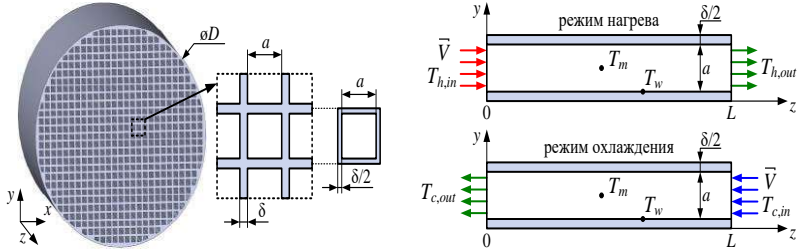


Рис. 1 – геометрическая модель

Система дифференциальных уравнений

Математическая модель регенеративного теплообменного аппарата, которая позволит проводить численные исследования его работы, включает в себя систему дифференциальных уравнений, состоящую из:

– уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

– уравнений движения

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad}(u)) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad}(v)) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad}(w)) - \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (4)$$

где u , v , w – проекции вектора скорости \vec{V} на оси координат x , y и z , соответственно, τ – время, P – давление, ρ – плотность, μ – коэффициент динамической вязкости.

– уравнения энергии

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \vec{V} T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad}(T)\right), \quad (5)$$

где T – температура, c_p – теплоемкость, λ – теплопроводность.

– уравнения состояния идеального газа:

$$P = \rho RT, \quad (6)$$

где R – газовая постоянная.

– уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial(\rho_d T_d)}{\partial \tau} = \operatorname{div} \left(\frac{\lambda_d}{c_{Pd}} \operatorname{grad}(T_d) \right), \quad (7)$$

Индекс d в указанных величинах относится к параметрам твердого тела.

Для решения системы дифференциальных уравнений (1)–(7) задавались условия однозначности, которые включают:

– геометрические параметры канала (Рисунок 1) теплообменной секции: поперечное сечение представляет собой квадрат со стороной $a = 2,4$ мм. Длина канала $L = 99$ мм, толщина стенки и $\delta = 1$ мм. Общий диаметр теплообменной секции $D = 93$ мм.

– физические параметры: свойства воздуха и материала теплообменной секции (NiCrBSi) приведены в Таблице 1.

Таблица 1 - Теплофизические свойства материалов

Материал	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	μ , Па·с
воздух	1004	0,026	1,206	1,7·10 ⁻⁵
керамика (NiCrBSi)	5,7	495	2107	–

– начальные условия (при $\tau = 0$, $0 \leq z \leq L$):

$$T(x, y, z, 0) = T_d(x, y, z, 0) = T_0, \quad u = v = z = 0 \text{ м/с};$$

– граничные условия:

1) в режиме нагрева или вытяжном (направление движения совпадает с положительным направлением оси z), т.е. при $\tau_h \cdot (N - 1) \leq \tau \leq \tau_h \cdot N$:

$$T(0, y, z, \tau) = T_{h.in}, \quad u(0, y, z, \tau) = u_0, \quad P(0, y, z, \tau) = 0.$$

2) в режиме охлаждения или приточном (направление движения противоположно оси z), т.е. при $\tau_c \cdot N \leq \tau \leq \tau_c \cdot (N + 1)$:

$$T(L, y, z, \tau) = T_{c.in}, \quad u(L, y, z, \tau) = -u_0, \quad P(L, y, z, \tau) = 0,$$

где $N = 1, 2, 3, \dots, \infty$ – номер периода нагрева или охлаждения.

3) по окончании режима нагрева или охлаждения, т.е. при $\tau = \tau_c = \tau_h$ задавалось равенство температур потока $T(x, y, z, \tau_h) = T(x, y, z, \tau_c)$ и теплообменной секции $T_d(x, y, z, \tau_h) = T_d(x, y, z, \tau_c)$.

4) условия теплообмена между поверхностью теплообменной секции и воздухом:

$$T = T_w, \quad q = q_d,$$

где q – конвективный тепловой поток, q_d – тепловой поток за счет теплопроводности, T_w – температура поверхности стенки [4].

В ходе численного моделирования был выбран полупериод цикла работы ТАРТ, равным 90 секунд.

Результатами численного моделирования являлись поля скоростей, температур, давления, а так же основные параметры потока влажного воздуха в канале: среднемассовые параметры потоков, а также локальные характеристики.

Оценка достоверности разработанной математической модели проводилась путем сравнения полученных данных с результатами [4] – рисунок 2, а. Откуда следует, что расхождение данных составляет не более 1%, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели работы ТАРТ.

На рисунке 2, б показаны изменения температуры потоков воздуха (в режимах нагрева и охлаждения теплообменной секции) от времени. Откуда следует, что выход на квазистационарное состояние наблюдается с четвертого периода работы ТАРТ.

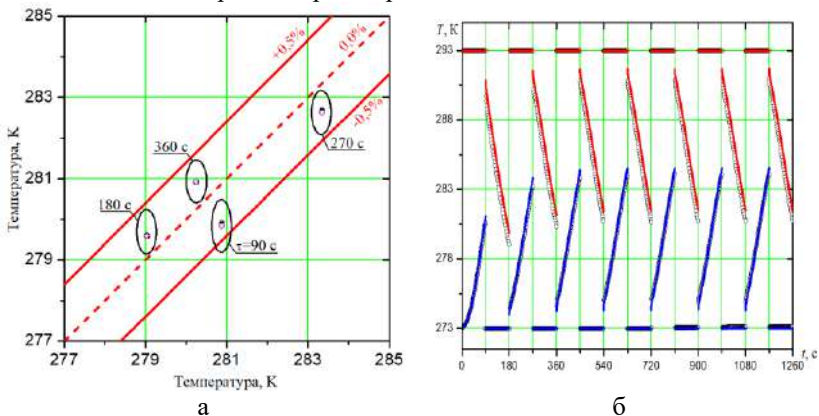


Рис.2 – результаты численного моделирования

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) сравнение численных данных с известными в литературе свидетельствуют о хорошей степени достоверности разработанной математической модели;

2) разработанная математическая модель позволит проводить оптимизационный анализ характеристик ТАРТ при варьировании исходных параметров (числа Рейнольдса, температуры, длины канала и т.д.). Данные вопросы будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

Литература:

1. Nicolas Carbonare, Hannes Fugmann, Nasir Asadov, Thibault Pflug, Lena Schnabel and Constanze Bongs. Simulation and Measurement of Energetic Performance in Decentralized Regenerative Ventilation Systems // *Energies*, 2020, v. 13. pp.1-25.

2. An additively manufactured novel polymer composite heat exchanger for dry cooling application/ Arie M.A., Hymas D.M., Singer F., Shooshtari A.H., Ohadi M. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020. pp. 1-11.

3. Penev A. and Tsokov L. Application of polymer thermal store material in fixed honeycomb regenerative heat exchanger, In *E3S Web Conf*, 207, 2020. p. 01001

4. Penev A., Tsokov L., Vassilev M. Verification and validation of a CFD model of a fixed regenerator for heat recovery from air // *E3S Web Config. Volume 327*, 2021.

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТИПА

С.Д. Шабалов

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 1999_serg@list.ru

Научный руководитель: Горбачев М.В., к.т.н., доцент

В работе проводится обзор современного состояния исследований теплообменных аппаратов регенеративного типа, а также влияние различных параметров (геометрии, свойств воздуха, скорости потока и др.) на их тепловую эффективность данных. Приводятся выводы по результатам обзора литературы.

The paper reviews the current state of research on regenerative type heat exchangers, as well as the influence of various parameters (geometry, air properties, flow velocity, etc.) on their thermal data efficiency. Conclusions based on the results of the literature review are presented.

Введение

При оценке энергоэффективности жилых зданий выделяется ряд потерь теплоты, связанных с наружным ограждением (стены и окна), а другие потери – расход энергии на нагрев воздуха в системе вентиляции. При этом, потери теплоты от агрегатов вентиляции могут составлять до 50%. Чтобы уменьшить эти значения, можно использовать вентиляционные системы с функцией рекуперации теплоты, а именно, применять теплообменные аппараты регенеративного типа (ТАРТ) [1].

В таких аппаратах снижение потерь осуществляется за счет использования рекуперации теплоты вытяжного воздуха. При этом изменения направления потока воздуха через насадку системы вентиляции происходят периодическим образом.

Состояние исследований теплообменных аппаратов

На сегодняшний день в известной литературе имеются сведения о проведенных исследованиях тепловой эффективности теплоутилизаторов, а также ТАРТ, встроенных в децентрализованную систему вентиляции [2]. Пример теплообменной (или теплоутилизационной) секции такого аппарата приведен на рисунке 1.

В работах [3,4] по исследованию влияния материала и геометрических размеров ТАРТ, получены следующие результаты:

– при варьировании (а именно, при увеличении) длины теплообменной насадки тепловая эффективность теплообменного аппарата увеличивается, но скорость ее роста при этом уменьшается;

– при использовании полимерных материалов, можно добиться увеличения тепловой эффективности аппаратов. Подтверждением данного факта также может служить работа [5].

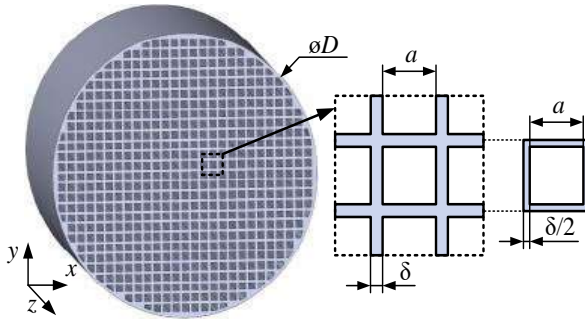


Рис.1 – схема теплообменной насадки

В [5] авторами проведено исследование теплообменного аппарата, изготовленного с использованием аддитивных технологий. В результате экспериментов, авторы установили, что используя полимерные материалы можно достичь увеличения удельных тепловых потоков на 220% и 125% в сравнении с металлическими материалами.

В ходе исследований по использованию насадок, выполненных из различных материалов [6], было установлено, что наиболее подходящими для их изготовления являются полимеры и керамика, это показано на рисунке 2.

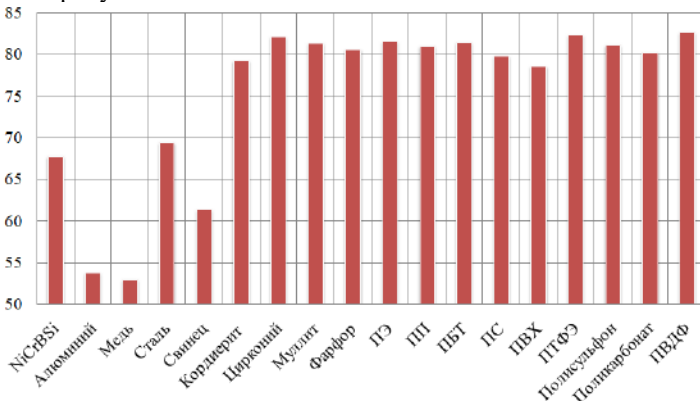


Рис.2 – влияние материала теплообменной секции на тепловую эффективность

Отдельной группой параметров, влияющих на тепловую эффективность ТАРТ, можно выделить: время цикла работы, толщина

стенок канала и расходы воздуха, проходящего через каналы теплообменника. Так, в работах [7, 8] в результате численного моделирования получены следующие выводы: увеличение длины, увеличение времени цикла работы и утолщение стенок материала приводит к повышению эффективности работы теплообменного аппарата. Однако, увеличение расхода воздуха приводит к снижению эффективности.

Стоит отметить тот факт, что верификация результатов численного моделирования рассматриваемых аппаратов должна проводиться с применением экспериментальных данных. Так, в работе [9] рассматриваются вопросы численного и экспериментального исследования ТАРТ, через который проходит поток влажного воздуха. Полученные результаты при моделировании отличаются от экспериментальных не более, чем на 9%.

Заключение

Проведение натурных и численных исследований ТАРТ является актуальной задачей. Несмотря на большое количество работ по изучению таких аппаратов можно выделить следующие нерешенные вопросы: отсутствует информация об изменении локальных и интегральных характеристик потоков воздуха (поля скоростей, температур, давлений, чисел Нуссельта и т.д.) в каналах теплообменной секции.

Литература:

1. Dadoo A., Gustavsson L. and Sathre R. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings, *Energy Building*, 2011, Vol. 43, P. 1566 –1572.
2. Simulation and Measurement of Energetic Performance in Decentralized Regenerative Ventilation Systems / Nicolas Carbonare, Hannes Fugmann, Nasir Asadov, Thibault Pflug, Lena Schnabel and Constanze Bongs // *Energies*, 2020, v. 13. pp.1-25.
3. Nizovtsev M.I., Letushko V.N., Borodulin V.Yu. Regenerative air heat exchanger with intermediate heat carrier // *Journal of Physics* 1105, 2018. pp.1-6
4. Nizovtsev M.I., Borodulin V.Yu. A criteria analysis of the effectiveness of air-to-air heat exchangers with periodic change of airflow direction // *Applied Thermal Engineering*, v.130, 2018. pp.1246-1255
5. An additively manufactured novel polymer composite heat exchanger for dry cooling application / Arie M.A., Hymas D.M., Singer F., Shooshtari A.H., Ohadi M // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020. pp. 1-11.

6. Penev A and Tsokov L. Application of polymer thermal store material in fixed honeycomb regenerative heat exchanger, In E3S Web Conf, 207, 2020. p. 01001

7. Mezentsev I.V., Mezentseva N.N., Aktershev S.P. The regenerative heat exchanger with periodic veering of the flow // Journal of Physics 1382, 2019.

8. Mezentsev I. V., Mezentseva N.N., Aktershev S.P. Parametric study of a regenerative heat exchanger for ventilation with a periodic change in the air flow direction. // Applied Thermal Engineering, v.202, 2022.

9. Penev A., Tsokov L., Vassilev M. Verification and validation of a CFD model of a fixed regenerator for heat recovery from air // E3S Web Config. Volume 327, 2021.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В УЗКОМ КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКОЙ

Н. Ян Лун

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, yln1999@mail.ru

Научный руководитель: Терехов В.И., д.т.н., профессор

Проведено экспериментальное исследование теплообмена в канале с одиночной траншейной лункой. Положение лунки в канале соответствовало углу наклона к направлению потока $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$. Число Рейнольдса, вычисленное по эквивалентному гидравлическому диаметру, варьировалось в диапазоне $Re = 2 \cdot 10^4 \dots 8 \cdot 10^4$. Тепловые граничные условия соответствовали $q_w = \text{const}$. Максимальная величина локальной интенсификации теплообмена достигается на задней по потоку кромке траншеи и равной $Nu/Nu_0 = 1,75$. Средняя теплоотдача при этом возрастает незначительно как при обтекании перпендикулярно ориентированной лунки ($\varphi = 90^\circ$), так и под углом к потоку и ее величина не превышает $Nu/Nu_0 \leq 1,2$.

An experimental study of heat transfer in a channel with a single trench dimple was carried out. The position of the dimple in the channel corresponded to the angle of inclination to the flow direction $\varphi = 90^\circ$ and $\varphi = 45^\circ$. The Reynolds number, calculated from the equivalent hydraulic diameter, varied in the range $Re = 2 \cdot 10^4 \dots 8 \cdot 10^4$. Thermal boundary conditions corresponded to $q_w = \text{const}$. The maximum value of local heat transfer intensification is achieved at the downstream edge of the trench and is equal to $Nu/Nu_0 = 1.75$. In this case, the average heat transfer increases slightly both when flowing around a perpendicularly oriented dimple ($\varphi = 90^\circ$) and at an angle to the flow and its value does not exceed $Nu/Nu_0 \leq 1.2$.

В различных отраслях современной техники есть острая необходимость в разработке новых систем интенсивного охлаждения, поэтому исследования в области интенсификации теплообмена активно проводятся во всем мире. К настоящему времени накоплен большой объем данных по влиянию различных вихрегенераторов на тепловые характеристики и гидравлические потери [1,2]. К таковым относятся лунки [3], табы, ребра, V-образные вихрегенераторы и т.д. В последние годы для целей интенсификации теплообмена активно пропагандируются удлиненные траншейные лунки, которые, по результатам численных исследований [4], обладают уникальными теплогидравлическими характеристиками. Аномальные свойства наклонных траншейных лунок согласно [4], объясняются наличием мощных вторичных течений вдоль размаха траншеи, которые приводят к интенсификации теплообмена. Однако экспериментального подтверждения эти выводы не получили [5]. Настоящая работа является развитием этих исследований по изучению локальной и средней теплоотдачи на стенке плоского канала при наличии одиночной траншейной лунки, с углами наклона к оси канала $\varphi = 45^\circ$ и 90° и вариации числа Рейнольдса.

Экспериментальная установка и методы измерений

Экспериментальное исследование теплообмена проводилось на том же рабочем участке, на котором изучались поля давлений и структура течения в одиночной траншейной лунке [5]. Схема исследуемой лунки, ее размеры и система координат представлена на рис.1. На одной из стенок плоского канала размерами $20 \times 150 \times 800$ мм располагалась одиночная траншейная лунка, которая в поперечном сечении представляла собой цилиндрический сегмент с полусферическими закруглениями на концах. Глубина лунки были равна $\Delta = 3,3$ мм, ширина $D = 15$ мм и длина $L = 105$ мм. Угол наклона лунки к продольной оси составлял $\varphi = 45^\circ$ и 90° . Опыты проводились в режиме $q_w = \text{const}$ за счет нагрева металлической фольги, толщиной 100 мкм. Температура поверхности измерялась тепловизором фирмы Testo. Число Рейнольдса, вычисленное по гидравлическому диаметру канала и средней скорости в нем, варьировалось в диапазоне $Re = 1,9 \cdot 10^4$ до $Re = 8,3 \cdot 10^4$.

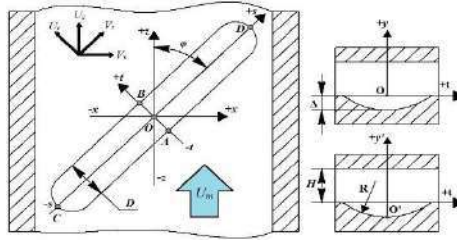


Рис.1 – геометрия исследуемой лунки и система координат

Локальные характеристики теплообмена.

Все опытные данные здесь представлены в виде изменения параметра интенсификации теплообмена Nu/Nu_0 по поверхности канала. Если траншея располагается перпендикулярно потоку, то картина теплообмена качественно подобна обтеканию полусферической лунки [3]. Перед лункой начинается небольшое снижение теплоотдачи и по мере продвижения внутрь лунки, теплообмен ослабевает, и минимум достигается в первой половине лунки. Затем, теплообмен возрастает, превышает уровень до лунки, и выходит на максимум в окрестности задней кромки. Максимум теплообмена соответствует точки присоединения пограничного слоя. После лунки наблюдается спад теплообмена и его восстановление после 2-х калибров. При этом по размаху траншеи изменения теплоотдачи не наблюдается и все профили по координате S совпадают между собой.

Принципиально по-иному ведет себя теплоотдача при ориентации траншеи под углом $\varphi = 45^\circ$ к потоку. Эти данные изображены на рис. 2. Видно, что распределения в различных сечениях по размаху траншеи значительно отличаются друг от друга и наибольший теплообмен достигается в области втекания потока в траншею ($s/D = -3$, рис 2а). В сечении выхода потока из траншеи ($s/D = +3$, рис 2в) интенсивность теплообмена понижается, что обусловлено гидродинамическими особенностями отрыва потока в наклонной траншее [5].

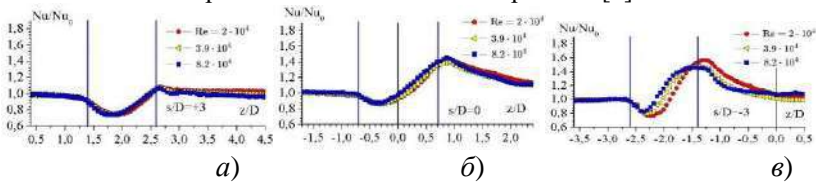


Рис.2 – профили чисел Nu/Nu_0 для угла поворота лунки $\varphi = 45^\circ$
 а) в сечении $s/D = -3$; б) $s/D = 0$; в) $s/D = +3$.

Максимальная интенсификация локального теплообмена, как это следует из рис. 2, составляет примерно 70% во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса. Такого же порядка эта величина получена и в работе [6] для иных размеров траншеи и тепловых граничных условий. На выходе из траншеи интенсификации теплообмена не происходит.

Средние характеристики теплообмена.

Важной характеристикой теплообменного аппарата является величина средней теплоотдачи. В работе, путем интегрирования находился средний теплообмен по всей поверхности траншеи, а также по участку канала длиной $l/D = \pm 3$. Эти данные показаны на рис. 3 в виде зависимости $\langle Nu/Nu_0 \rangle$ от числа Рейнольдса.

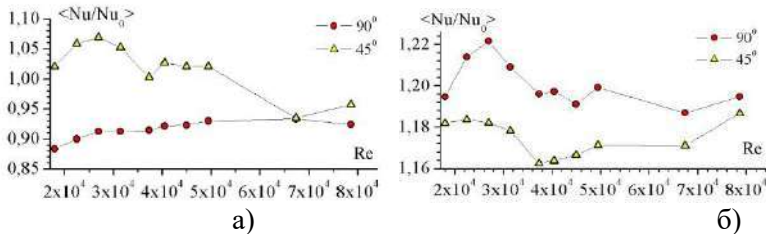


Рис. 3– осредненное относительное число Нуссельта $\langle Nu/Nu_0 \rangle$
 а) по лунке б) по участку

Теплообмен непосредственно в лунке лучше у наклонной лунки $\varphi = 45^\circ$, чем у нормально ориентированной $\varphi = 90^\circ$ (рис. 3а). Эффект интенсификации у наклонной траншеи весьма слабый, а при $\varphi = 90^\circ$ в ней происходит подавление теплопереноса.

Ожидаемо, что значения среднего по участку $\langle Nu/Nu_0 \rangle$, как для нормально ориентированной, так и для наклонной лунок, выше чем средние по поверхности лунки. Это объясняется тем, что основное усиление теплообмена происходит в области за лункой. При обтекании перпендикулярно ориентированной траншеи, относительный теплообмен варьируется в пределах $\langle Nu/Nu_0 \rangle = 1,19...1,21$. Для наклонной лунки тот же показатель чуть ниже: $\langle Nu/Nu_0 \rangle = 1,16...1,19$. Полученные данные согласуются с [7], где средний по участку теплообмен для

повернутой на $\varphi = 45^\circ$ лунки выше, чем в плоском канале в 1.22 раза. При этом эффекты аномальной интенсификации теплообмена, обнаруженные в численных исследованиях в работе [4], в настоящих экспериментах не подтверждаются.

Литература:

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1990. – 200 с.
2. Ligrani P. Heat Transfer Augmentation Technologies for Internal Cooling of Turbine Components of Gas Turbine Engines // *Int. J. of Rotating Machinery*. – 2013. – Art. ID 275653, 32 p.
3. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M. A review on heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. – 2017. – Vol. 24. iss. 1-6. – P. 411-426
4. Isaev S.A et al. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 145. 118737.
5. Экспериментальное исследование структуры течения в одиночной траншейной лунке / Терехов В.И., Терехов В.В., Чохар И.А., Ян Лун Н. // *Теплофизика и Аэромеханика*. – 2022. – Т. 29, № 6. – С. 935-947
6. Isaev S., Seroshtanov V., Mityakov V., and Sapozhnikov S. Gradient heatmetry and PIV combination in the study of flow in an oval-trench dimple // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. (в печати).
7. Leontiev A.I., Kiselev N.A., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M., Zditovets A.G., Burtsev S.A. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – Vol. 118. – P. 152-167

Секция КОНСТРУКЦИЯ И ДЕЙСТВИЕ
СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ И БОЕПРИПАСОВ

**ВЛИЯНИЕ НАЛАДКИ ПАКЕТА ШТАМПА НА
РАЗНОСТЕННОСТЬ КОЛПАКА НА ОПЕРАЦИИ
СВЕРТЫВАНИЯ**

А.К. Абдразаков, А.В.Гуськов
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск
Научный руководитель: Гуськов А.В., д.т.н., доцент

Проведены исследования по определению влияния наладки пакета штампа на разностенность колпака и предложена методика оценки влияния рабочего инструмента на процесс свертывания.

Studies have been carried out to determine the effect of the adjustment of the stamp package on the cap thickness difference and a method for assessing the effect of the working tool on the folding process has been proposed.

Свертывание то есть превращение плоской заготовки в изделие, имеющее форму колпачка, является одной из основных операций в производстве полых элементов патронов, от которой зависят: - получение изделия хорошего качества; - стойкость инструмента; - количество брака в процессе изготовления. На рис.1 представлена схема совмещения двух переходов- вырубке заготовки и свертывания.

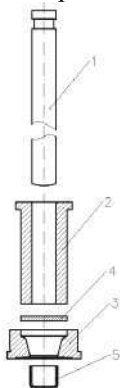


Рис.1 – Схема вырубке и свертки колпака
1- сверточный пуансон; 2- вырубной пуансон; 3- матрица;
4- вырубленная заготовка; 5- свернутый колпак

Основными условиями для нормального течения процесса свертки являются: правильная настройка (наладка) оборудования (пакета штампа); правильное соотношение между диаметром вырубленного кружка и диаметром колпачка; - состояние металла кружка и доброкачественность его вырубке; - правильная геометрическая форма и правильные размеры инструмента для свертки [3]. Все перечисленные условия влияют на параметр разностенности.

Для определения влияния наладки пакета штампа на разностенность свернутых колпачков предложена методика, включающая следующие этапы:

1- Разметка полосы (рис.2), основанная на выделении ориентации получаемых заготовок-колпачков относительно рабочего инструмента при вырубке и последующей свертке. Полоса размечена тремя различными по цвету линиями для дальнейшей сортировки колпачка на три группы, каждая линия имеет свой рабочий инструмент (матрицу и пуансоны) и свою наладку.



а)



б)

Группа 1 -.-.-.-.-.; -Группа 2 ———; Группа 3 -.-.-.-.-

Рис. 2 – Разметка полосы

Разметка проводится с целью определения начального положения вырубаемой и свертываемой заготовки с последующим ориентированием относительно линии разметки и движения пуансона.

2- На установке по измерению разностенности (рис. 3) проведены замеры разностенности колпачка. Взята выборка с каждой группы в количестве 10 шт.



Рис. 3 – Установка для замера разностенности
 Результаты замера приведены в таблице 1.

Таблица 1- Результаты замера разностенности колпака

Тип линии №	Группа 1 -----	Группа 2 _____	Группа 3 - - - - -
1	0,02	0,02	0,04
2	0,02	0,03	0,04
3	0,02	0,03	0,03
4	0,03	0,03	0,04
5	0,02	0,03	0,04
6	0,02	0,04	0,03
7	0,03	0,03	0,04
8	0,02	0,03	0,03
9	0,03	0,03	0,03
10	0,04	0,03	0,04

По результатам замеров можно сделать вывод, что распределение разностенности имеет следующее процентное соотношение: в группе 1- 60%- 0,02мм; 30%-0,03мм; 10%-0,04мм, в группе 2- 10%-0,02мм; 80%-0,03мм; 10%-0,04мм, в группе 3- 40%-0,03мм; 60%-0,04мм.

3- На индикаторном стенкомере ЧИЗ С-10А с шагом поворота 30° определена толщина стенки колпака. Для замера взята выборка с каждой группы в количестве 3шт. Результаты замера представлены в таблице 2 и рис. 4.

Таблица 2- Результаты замера толщины стенки колпака

	Группа 1 - - - - -			Группа 2 ———			Группа 3 - - - - -		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0°	1,38	1,39	1,39	1,38	1,37	1,37	1,36	1,38	1,39
30°	1,38	1,38	1,39	1,38	1,37	1,36	1,36	1,38	1,38
60°	1,38	1,37	1,38	1,38	1,36	1,36	1,36	1,38	1,37
90°	1,39	1,37	1,37	1,39	1,35	1,36	1,36	1,38	1,37
120°	1,39	1,37	1,37	1,39	1,36	1,36	1,36	1,37	1,37
150°	1,39	1,37	1,37	1,40	1,36	1,36	1,36	1,37	1,37
180°	1,38	1,39	1,39	1,39	1,37	1,37	1,36	1,36	1,38
210°	1,38	1,39	1,39	1,37	1,38	1,38	1,37	1,35	1,39
240°	1,37	1,39	1,39	1,37	1,38	1,38	1,38	1,36	1,40
270°	1,37	1,39	1,39	1,36	1,39	1,39	1,38	1,37	1,39
300°	1,37	1,39	1,39	1,36	1,39	1,39	1,38	1,36	1,39
330°	1,37	1,39	1,39	1,37	1,39	1,39	1,37	1,36	1,38

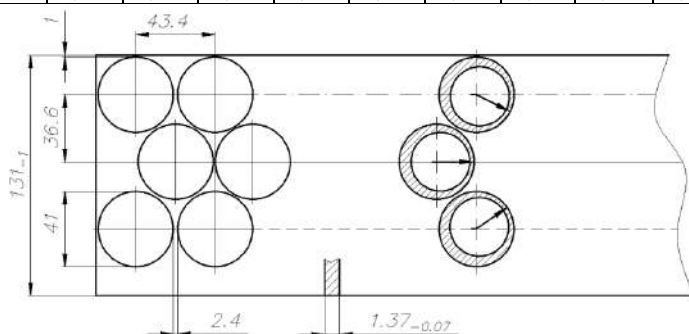


Рис. 4- Схема раскроя и расположение полученных заготовок относительно движения инструмента

По результатам исследования влияния наладки пакета штампа на разностность свернутых колпаков на каждую из трех выделенных групп по предложенной методике. Определено направление смещения и ее величина. Каждая выделенная группа образцов имеет одинаковое направление смещения. Следовательно, важную роль имеет наладка инструмента- совмещение оси матрицы и пуансона.

Литература:

1. *А.Р. Сафаряни.* Технология патронного-гильзового производства. ЦНИИ информации, 1975г.
2. *Г.А. Данилин., В.П. Загородников., А.Б. Заволокин.* Основы проектирования патронов к стрелковому оружию. –СПб., БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2005. С.101-105.

3. Малов А.Н. Производство патронов стрелкового оружия. М: Оборонгиз. 1947.

4. Н.П. Агеев., В.И. Зиновкина., Н.М. Масляева. Справочник по технологии патронного производства. Том 1, –СПб., 2011г.

5. А.К. Абдразаков; А.В.Гуськов; К.Е. Милевский; А.А.Пушкарев. Определение факторов, влияющих на кучность стрельбы патрона 8,6x69мм// Наука Промышленность Оборона: труды XXII Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. / коллектив авторов; под редакцией С.Д. Саленко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПУЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ

А.К. Абдразаков, А.В.Гуськов

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск

Научный руководитель: Гуськов А.В., д.т.н., доцент

Проведены исследования по определению анизотропии механических свойств материала полосы ДПРХМ Л90, использующей в производстве пульной оболочки.

Studies have been carried out to determine the anisotropy of the mechanical properties of the material of the ДПРХМ Л90 strip used in the production of the bullet shell.

В настоящее время остро стоит проблема повышения эффективности действия патронов стрелкового вооружения, производимых в массовом производстве. Повышение точностных характеристик патрона - важнейшая проблема, решаемая при производстве патронов.

Технологический процесс изготовления патрона состоит из разделительных и формообразующих операции обработки металлов давлением (свертка, вытяжка), в результате которой из плоской заготовки получают полую деталь из которой формируются конструктивные элементы деталей патрона. Поведение металла в нагружаемой конструкции зависит не только от формы и размеров изделия, но и от свойств исходного материала, способов его технологической обработки и, как следствие, от формируемой структуры и физико-механических свойств

В связи с этим проведены исследования по определению анизотропии механических свойств материала поступающих в производство.

Для определения механических свойств материала заготовки – полосы ДПРХМ Л90 ГОСТ 2208-2013, толщина -1.1мм, шириной- 131мм (рис.1) проведена серия экспериментов на разрывной машине Instron 3369.



Рис.1 – лента Л90

Для испытаний был рассчитан и разработан образец (рис. 2). Расчеты произведены согласно ГОСТ 1497-84 [1].

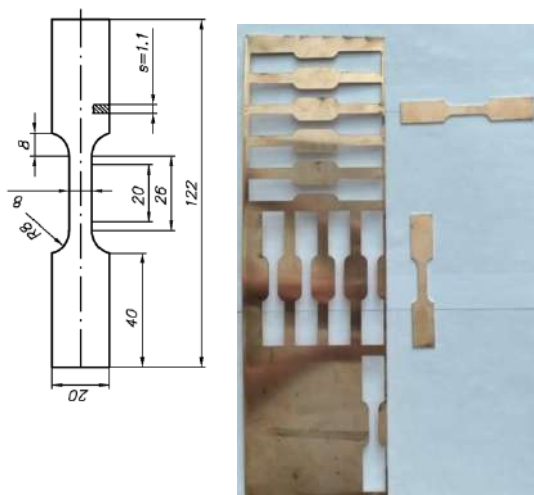


Рис.2 – Эскиз образца и фотография раскроя полосы

На лазерном оборудовании GLOW 3015 из ленты Л90 были вырезаны 5 образцов в горизонтальном и 5 образцов в вертикальном положении, согласно рассчитанным размерам.

Испытания проводились на разрывной машине Instron 3369. Установлены два датчика на перемещение и деформацию.

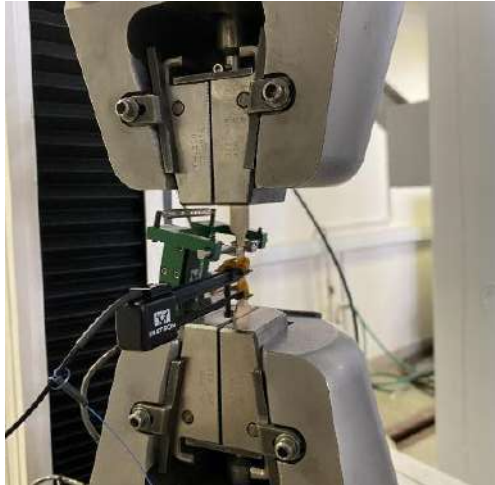


Рис.3 – Испытание образца.

Испытания проводились на 5 парах образцов (5 вертикально и 5 горизонтально). Приведены графики деформации и перемещения, выборочно для образцов 2,3.

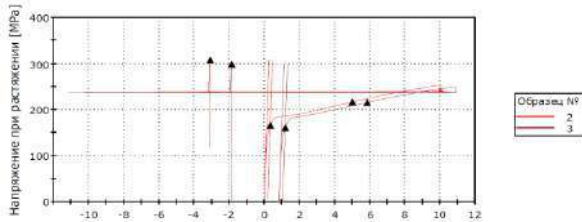


Рис.4 – График деформации (%)

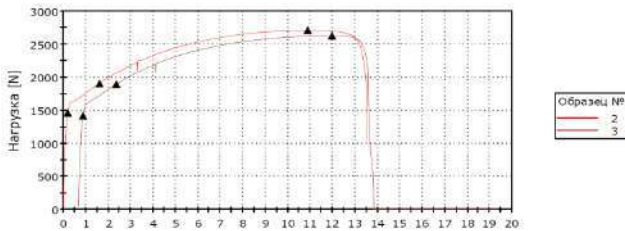


Рис.5 – График перемещения (mm)

В таблице 1 приведены результаты исследований для всех испытанных образцов в вертикальном положении.

**Таблица 1 – Результаты испытаний образцов
вертикального расположения**

	Метка образца	Максим. Нагрузка (N)	Напряжение при растяжении при максим. нагрузке (МПа)	Модуль Юнга	Напряжение при растяжении при пределе текучести (МПа)
	B1	2701,5	307,0	125077,0	168,8
	B2	2709,8	307,9	101362,2	168,6
	B3	2704,7	307,4	116414,8	165,4
	B4	2713,8	308,4	117906,7	166,6
	B5	2704,3	307,8	117014,8	165,5
Среднее значение		2706,82	307,7	115555,1	166,98

В таблице 2 приведены результаты исследований для всех испытанных образцов в горизонтальном положении.

**Таблица 2 – Результаты испытаний образцов
горизонтального расположения**

	Метка образца	Максим. Нагрузка (N)	Напряжение при растяжении при максим. нагрузке (МПа)	Модуль Юнга	Напряжение при растяжении при пределе текучести (МПа)
	G1	2594,5	299,0	109305,5	168,1
	G2	2627,1	298,5	109300,5	168,4
	G3	2572,8	292,4	107483,6	161
	G4	2632,4	299,1	106107,6	161,6
	G5	2628,4	294,1	108304,5	163,4
Среднее значение		2611,04	296,62	108100,3	164,5

В таблице 3 приведена сводная таблица данных для всех испытанных образцов в вертикальном и горизонтальном положении.

Таблица 3 – Сводная таблица испытаний образцов вертикального и горизонтального расположения

	Направление	Максимальная Нагрузка (N)	Напряжение при растяжении при максимальной нагрузке (МПа)	Модуль Юнга	Напряжение при растяжении при пределе текучести (МПа)	Коэффициент Пуассона (по хорде)	Деформация (%)
	Вертик.	2706,82	307,7	115555,1	166,98	0,25219	1,06764
	Горизонт.	2611,04	296,62	108100,3	164,5	0,24041	1,12138
Среднее		2658,93	302,16	111827,7	165,74	0,24630	1,09451
Стандарт откл.		67,726	7,834	5271,3	1,753	0,00833	0,03800

По результатам исследования анизотропии механических свойств исходного материала, используемого при изготовлении пульной оболочки, можно сделать вывод, что разница в значениях образцов вертикального и горизонтального направления составляет: по максимальной нагрузке (N)- 3,5%; по напряжению при растяжении и при макс. нагрузке- 3,6%; по модулю Юнга- 6,4%; по напряжении при растяжении и при пределе текучести- 1,48%.

Литература:

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
2. Р.А.Адамеску, П.В. Гельд, Е.А. Митюшов. Анизотропия физических свойств металлов. М.: Металлургия- 1985-136с.
3. Малов А.Н. Производство патронов стрелкового оружия. М: Оборонгиз. 1947.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ БОРА

Н.С. Белоусова

¹ Институт химической кинетики и горения
им. Воеводского СО РАН,

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск nata.bel@kinetics.nsc.ru

Научный руководитель: Глозов О. Г., к.ф-м.н., доцент

Исследовано влияние добавок на характеристики горения смесевых топлив с бором и додекаборидом алюминия. Представлены две применяемые методики (установки) для отбора конденсированных продуктов горения при повышенных давлениях. Методики нацелены на имитацию горения топлива в прямоточном воздушно-реактивном двигателе газогенераторной схемы. Экспериментально доказана возможность модификации характеристик горения топлив на основе бора и додекаборида алюминия (около 37%), перхлората аммония и связующего с помощью малых ($\approx 1\%$) добавок $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и MgF_2 .

The influence of additives on the combustion characteristics of composite propellants with boron and aluminum dodecaboride was studied. Two methods (installations) used for the selection of condensed combustion products at elevated pressures are presented. The methods are aimed at simulating fuel combustion in a ramjet engine with a gas generator circuit. The possibility of modifying the combustion characteristics of composite propellants based on boron and aluminum dodecaboride (about 37%), ammonium perchlorate and binder using small ($\approx 1\%$) additives has been experimentally proven $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ and MgF_2 .

В последние десятилетия возрастает интерес к ракетам, предназначенным для внутриатмосферной зоны применения и использующих для создания реактивной тяги прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД). При полёте в условиях атмосферы ПВРД обладает определенными преимуществами по сравнению с традиционным ракетным двигателем твердого топлива (РДТТ) за счет использования заборного окислителя. Наибольшей теплотой сгорания ($Q = 58.62$ кДж/г), среди высококалорийных металлов и элементов, выделяется металлоид бор [1]. У традиционно используемого алюминия теплота сгорания сравнительно меньше ($Q = 30.98$ кДж/г). Применение бора в обычных смесевых топливах ограничено тем, что он требует для своего окисления примерно в 2.5 раза больше кислорода, чем алюминий. Поэтому бор не нашел широкого применения в обычных ракетных двигателях. Однако, при наличии заборного окислителя указанное ограничение не существенно. Поэтому бор рассматривается как перспективный компонент топлив для ПВРД [2], [3], [4], что

стимулирует исследования горения бора и борсодержащих топлив в последнее время в разных странах [5].

Объектами исследования являются модельные смесевые топлива включающие около 37% одного из двух горючих – аморфного бора (В), либо додекаборида алюминия (AlB_{12}), бидисперсный перхлорат аммония, активное связующее МПВТ и (опционально) 1% добавки. Составы топлив приведены в Таблице 1. Добавки обозначены буквой «а» с цифрой: а1 – фторид магния MgF_2 ; а2 – фторопласт-4 ($-C_2F_4-$)_n; а3 – гексафторотитанат аммония $(NH_4)_2TiF_6$. Буква L в названии топлива означает использование конкретной партии додекаборида $AlB_{12}(L)$.

Таблица 1 - Компонентный состав (% масс.) исследованных модельных борсодержащих топлив

Топливо	Связ.	В	AlB_{12} (L)	а1	а2	а3
40В	30.5	37.57				
40Ва1	30.2	37.12		0.98		
40Ва2	30.2	37.13			0.99	
40Ва3	30.2	37.13				0.98
40 $AlB_{12}L$	30.5		37.50			
40 $AlB_{12}La1$	30.2		37.13	0.97		
40 $AlB_{12}La2$	30.2		37.13		0.99	
40 $AlB_{12}La3$	30.2		37.13			0.99

Эксперименты включали в себя определение скорости горения при давлениях 1.2 и 2.4 МПа, массы шлаков в виде каркаса, неполноты сгорания горючего по массовым и химическим критериям и вычисление параметра интегральной эффективности тепловыделения [6].

Представлены две применяемые методики (установки) для отбора конденсированных продуктов горения (КПГ) при повышенных давлениях и полученные экспериментальные данные. Методики нацелены на имитацию горения топлива в твердотопливном ракетном прямоточном двигателе газогенераторной схемы. В этой схеме имеется газогенератор с зарядом твердого топлива, обогащенного горючим. Первичные продукты горения топлива поступают в камеру дожигания (КД), куда также подается воздух, входящий через воздухозаборник. Продукты горения истекают из сопла КД, создавая реактивную тягу.

На первой стадии в камере газогенератора горит твердое топливо с повышенным содержанием порошкообразного горючего. Эту стадию исследовали с помощью проточной бомбы, предназначенной для отбора КПГ. Применяли вариант с замораживанием частиц вблизи поверхности

горения образца в спутным потоке аргона с последующим улавливанием частиц на ситовые сетки и аэрозольный фильтр. Фактически, определены характеристики частиц, покидающих поверхность горения, так называемые «первичные» продукты горения. Камеру дожигания имитировали в другой установке – 10-литровой бомбе с окнами, заполненной воздухом под давлением. В ходе эксперимента производится видеосъемка, сочетающая возможности шпирен-метода и регистрации в собственном свечении. Отбор КПП осуществлялся в поддон, помещенный на дне бомбы.

Анализ полученных данных показал, что: (1) В большинстве случаев безразмерные массы КПП для давлений 1.2 и 2.4 МПа близки (в пределах погрешности). Это указывает на то, что свойства металлического горючего (МГ) и его поведение в волне горения играют более важную роль в процессе превращения МГ в оксид, чем давление. (2) Топлива с додекаборидом дают меньшую или сопоставимую массу каркаса, чем топлива с бором. (3) Масса каркаса не коррелирует со скоростью горения. (4) Масса каркаса под действием добавок для топлив с бором меняется сильнее, чем для топлив с додекаборидом. Добавки могут как усиливать, так и ослаблять образование каркаса. Эффект, однако, невелик и находится практически в пределах погрешности. (5) Эффективность энерговыделения E определяется в основном величиной полноты сгорания $(1 - \eta)$, которая сильнее изменяется от топлива к топливу, чем другие множители в формуле для E . (6) Для топлив с бором действие добавок инвариантно по отношению к давлению, для топлив с додекаборидом – нет. (7) Для топлив с бором все исследованные добавки повышают эффективность энерговыделения E . Наибольшее повышение E достигнуто в случае добавки $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ и давления 1.2 МПа. Для топлив с додекаборидом наибольший эффект достигнут в случае добавки MgF_2 , однако повышение E зарегистрировано при 2.4 МПа, а при 1.2 МПа эффект противоположный. Потенциальное тепловыделение зависит от количества горючего в топливе, его теплотворной способности, и его «качества» с учетом начальной окисленности. Реализация теплоты МГ определяется полнотой сгорания и также зависит от количества остатков в стаканчике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-781.

Литература:

1. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошковых металлов в активных средах. Москва: Наука, 1972. 294 с.
2. Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховоломов В.К., Граменицкий М.Д., Дулепов Н.П., Скибин В.А., Суриков Е.В., Хилькевич В.Я., Яновский Л.С. Интегральные прямоточные воздушно - реактивные двигатели на твердых топливах (основы теории и расчета). Москва. 2006.
3. Суриков Е.В., Шаров М.С., Фельдман В.Д. Ракетные прямоточные реактивные двигатели на твердом и пастообразном топливе. Москва: Физматлит, 2010. 320 с.
4. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Ягодников Д.А. Проектирование и разработка твердотопливных прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Москва: Издательство: МГТУ им. Баумана, 2016. 317 с.
5. Pang W., De Luca L.T., Fan X., Glotov O.G., Zhao F. Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects. CRC Press, Taylor & Francis Group, an Informa Group company, 2019. 323 pp.
6. Глотов О.Г., Замашников В.В., Суродин Г.С., Белоусова Н.С. Влияние фторсодержащих добавок на характеристики горения смесевых топлив с бором и додекаборидом алюминия // Инженерно-физический журнал, Т. 95, № 7, 2022. С. 1764-1771.

ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПВО ДЛЯ БОРЬБЫ С МАЛЫМИ БПЛА НА ВЫСОТАХ ДО 3000 МЕТРОВ

В.В. Романов², Р.В. Демин², Е.Я. Брагунцов^{1,2}, С.С. Назаров^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²АО «Институт прикладной физики»

г. Новосибирск, nazarov.s.2000@mail.ru

В данной статье проведен анализ характеристик БПЛА, в частности малых БПЛА, дана оценка эффективности применения существующих комплексов ПВО против малых БПЛА. Предложено направление развития комплексов ПВО для борьбы с малыми БПЛА на высотах до 3000м, в виде комплекса на базе малокалиберного НАРВ.

This article analyzes the characteristics of UAVs, in particular small UAVs, and assesses the effectiveness of the use of existing air defense systems against small UAVs. The direction of development of air defense systems to combat small UAVs at altitudes up to 3000m, in the form of a complex based on a small-caliber NARV, is proposed.

В настоящее время идет спешный поиск новых способов борьбы с бурно развивающимся классом техники – беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), которые представляют все большую опасность не только на линии боевого соприкосновения, но и для многих объектов экономики, инфраструктуры и массовых мероприятий в мирное время.

При появлении БПЛА возникли проблемы, связанные с его обнаружением и обезвреживанием (уничтожением).

В современных системах противовоздушной обороны (ПВО) главным средством обнаружения БПЛА являются радиолокационные станции (РЛС). При этом для уничтожения БПЛА используется самое разное оружие.

Действительно, БПЛА имеют различные конструкции и отличаются по характеристикам, например, по взлетной массе, грузоподъемности, дальности, высоте и продолжительности полета, размерам самих аппаратов и т.д., следовательно, для обнаружения и уничтожения БПЛА различных классов требуются не универсальные, а различные средства обнаружения и различные типы вооружения, существенно отличающиеся по характеристикам и способам применения.

Для уничтожения небольших БПЛА нецелесообразно по стоимости и невозможно на переднем крае применять дорогостоящие и уязвимые средства обнаружения и поражения существующих систем ПВО.

На основании анализа характеристик БПЛА и существующих комплексов ПВО, в работах [1,2] предложены наиболее целесообразные и доступные на переднем крае обороны средства поражения, применение которых по выбранным типам БПЛА наиболее эффективно. Для анализа характеристик БПЛА была использована универсальная классификация зарубежных БПЛА Международной ассоциации по беспилотным летательным системам UVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International). В качестве критериев отбора для обоснования выбора типов, поражаемых БПЛА и боеприпасов для их поражения использованы характеристики, определяющие возможность поражения, такие как высота полета БПЛА и уязвимая (доступная для поражения) площадь поражения.

Наиболее важный показатель — это высота полета БПЛА, которая должна находиться в пределах радиуса действия предлагаемых для применения средств поражения. По этому показателю, малые БПЛА можно разделить на две подгруппы. Первая подгруппа БПЛА с высотой полета до 300 м и вторая подгруппа с высотой полета до 3000 м. Ко второй подгруппе можно отнести также тактические маловысотные БПЛА с большой продолжительностью полета и высотой полета до 3000 м.

Следующий показатель — это уязвимость БПЛА, которая характеризуется уязвимой площадью поражения. Уязвимость коррелирует с взлётной массой БПЛА и высотой полета. На большой высоте летают аппараты большей массы и с большей уязвимой площадью. Наибольшую сложность для поражения представляют БПЛА с малой уязвимой площадью поражения (малой массой) и большой высотой полета. Для БПЛА с высотой полета до 300 м уязвимая площадь поражения оценивается в 0,03 м², а для БПЛА с высотой полета до 3000 м наименьшая уязвимая площадь поражения оценивается в 0,1 м².

В работах [1,2] показан потенциал боевого применения выстрелов к подствольным гранатометам типа ВОГ-25 и противотанковых ручных гранатометов для борьбы с БПЛА на высотах до 300м.

На высотах более 300м применяют средства радиоэлектронного поражения, «антидроны», лазерные комплексы, а также различные ракетные и ракетно-пушечные комплексы.

Д-р воен. наук генерал-лейтенант в отставке В.В. Барвиненко и д-р воен. наук полковник В.Н. Тикшаев в статье [3] «Проблема борьбы с беспилотными летательными аппаратами и возможные пути ее решения» журнала «Военная мысль» отмечают: «На данный момент основное направление этих разработок — создание специализированных средств радиотехнической разведки и радиоэлектронного поражения (подавления) каналов систем навигации и управления БПЛА, а также их разведывательной аппаратуры. Практически все специализированные средства борьбы с БПЛА в России ведутся объединениями и предприятиями военно-промышленного комплекса (ВПК) исключительно в инициативном порядке с надеждой, что на них найдутся покупатели. Это обуславливает создание средств, работа которых основана на одних и тех же принципах и которые имеют близкие характеристики. Мобильный многофункциональный комплекс противодействия БПЛА «Сапсан-ПРО» подавляет сигналы радиоэлектронных средств (РЭС) навигационных систем, систем связи и управления БПЛА в зоне радиусом до 12 км; стационарные комплексы «Купол», «Рубеж-Автоматика» и «Таран-ПРО» — в зоне радиусом до 1,5км; комплексы «Сапсан-Бекас» и «Репеллент» — в зоне радиусом до 15км. Носимые комплексы (электромагнитные ружья) REX 1 и «Пищаль ПРО» в условиях оптической видимости действуют на расстоянии до двух километров. Радиоэлектронный комплекс «СЕРП» может обнаруживать малоразмерные БПЛА даже в условиях городской застройки и подавлять их каналы управления и навигации на расстоянии до 20км...

Другими направлениями разработок средств борьбы с БПЛА являются создание «антидронов», средств, применяющих «ловчие» сети, лазерных, пучковых, звуковых и программных средств. Считаются достаточно эффективными средствами борьбы с БПЛА обычные («ловчие») сети из тонкого волокна. В России разработан многоцелевой беспилотный комплекс «Карнигора», оснащенный сетью для вывода из строя БПЛА противника. Лазерные средства борьбы с БПЛА для кораблей и Сухопутных войск в России могут быть разработаны как аналог лазерного комплекса «Пересвет». Создаются средства для звуковых и программных способов противодействия. Звуковое воздействие на гироскопы при совпадении с частотой резонанса этих элементов приводит к выходу из строя БПЛА. Такой аппарат уже создан в Южной Корее. Разработка программных средств направлена на перехват управления БПЛА. Изучается возможность использования против беспилотников электромагнитных систем, поражающих цель мощным импульсом.» [3]

Из доклада сотрудников Военно-воздушной академии имени Жуковского, опубликованном в сборнике докладов и статей XXI Всероссийской научно-практической конференции ВВС и ПВО, которая прошла в октябре 2021г. в Ярославле, в стенах Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны – под название «Состояние и перспективы развития зенитных ракетных комплексов в интересах противодействия беспилотным летательным аппаратам», отмечается [4]:

1) Результаты полигонных испытаний ЗРПК «Панцирь-С1» показывают, что стрельба ракетным вооружением по малоразмерным БПЛА практически невозможна. Причиной этому является малая дальность обнаружения малоразмерных БПЛА РЛС обнаружения и целеуказания, которая так же, как и для ЗРК «Тор», составляет 3-5 км, что практически совпадает с ближней границей зоны поражения ЗУР;

2) Испытания ЗРК «Стрела-10МЗ» показывают, что этот комплекс способен поражать мини-БПЛА типа «Акила» только в дневных условиях;

3) Расчётные дальности захвата ГСН ЗУР мини-БПЛА типа «Акила» фотоконтрастным каналом по аналогичным причинам будут невысокими и составляют 2,8-3,5км, а захват цели по инфракрасному каналу вообще невозможен из-за её крайне слабого теплового излучения. При этом, что БПЛА «Акила» является устаревшим мини-БЛА, снятым с вооружения, а современные мини-БЛА имеют меньшие в 1,5-2 раза размеры и тепловую контрастность. В связи с этим, эффективность стрельбы по таким целям будет ещё ниже. Результаты боевых пусков по

мишеням - аналогам малоразмерных воздушных целей показали, что стрельба ЗРК «Стрела-10СВ» и «Стрела-10М» обеспечивается в фотоконтрастном диапазоне в основном вдогон, а на встречном курсе - в ограниченной части зоны пуска. Дальности пуска ракеты составили для этих комплексов в среднем 1,5-2км;

4) Результаты полигонных испытаний ЗРПК «Панцирь-С1» показывают, что применение пушечного вооружения этих ЗРК против малоразмерных БПЛА принципиально возможно, но по причине малых размеров БПЛА, вероятность их поражения невелика;

5) Практический опыт экспериментальных стрельб по малоразмерным мишеням - аналогам БПЛА «Пчела», свидетельствует о низкой эффективности их поражения. Основными причинами этого являются несовершенство системы управления подрывом боевой части ЗУР, а также большие ошибки сопровождения цели и наведения ЗУР на малоразмерные БПЛА;

б) Стрельба ЗРПК «Тунгуска» по БПЛА пушечным вооружением принципиально возможна, однако ввиду малых геометрических размеров БПЛА эффективность стрельбы по нему невелика. Практика показывает, что при обстреле мини-БПЛА типа «Акила» пушечным вооружением на дальности 3 км для достижения значения условной вероятности поражения цели равной 0,5 необходимо израсходовать от 4 до 13 тыс. снарядов (т.е. 2-6 б/комплекта), на дальности 1 км - от 0,5 до 1,5 тыс. снарядов (0,3-0,8 б/комплекта).

Так же следует отметить и расход ракет на поражение цели ЗРК подразделений российского контингента в Сирии в 2017 году (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ВКС В САР							
№ п/п	Дата	Позиция	Уничтожение			Тип цели	Выход ЗУР
			Д (км.)	Н (км.)	У (км./ч)		
2017 год							
1	23.03	Масьяф	5	2	360	реактивный баллон	1
2	27.03	Хмеймим	4	2	1080	Реактивный снаряд	1
3	27.03	Хмеймим	3	1,5	980	Реактивный снаряд	1
4	29.03	Хмеймим	5	4	1320	Реактивный снаряд	1
5	9.04	Тартус	13,7	6,4	120	БЛА типа «Негон»	1
6	4.05	Масьяф	3,5	1,5	60	Мини-БЛА	1
7	11.05	Тартус	3,2	2,5	110	БЛА типа «Байрактар»	1
8	20.05	Тартус	8,8	7,3	147	БЛА типа «Негон»	1
9	27.05	Тартус	5	9,1	110	БЛА типа RQ-21A «Интегратор»	3
10	17.06	Хмеймим	15,1	11,7	90	Дрейфующий аэростат	2
11	21.06	Тартус	19	7,3	100	Малоразмерный воздушный шар	1
12	06.07	Масьяф	16,1	4,1	75	БЛА типа «Негон»	1

Рис. 1– Результаты боевых действий зенитных ракетных подразделений ВКС в САР.

Как видно из рис.1 ЗРК имеют большую боевую, и за счет малого расхода боеприпас – экономическую эффективности против реактивных снарядов, в отличии от поражения медленно движущихся объектов, типа БЛА RQ-21A «Интегратор» или дрейфующий аэростат. Основными причинами этого являются несовершенство системы управления

подрывом боевой части ракет, а также большие ошибки сопровождения цели и наведения ракет на малые БПЛА.

На рис. 2 представлены параметры зон поражения основных средств противовоздушной обороны (ПВО).

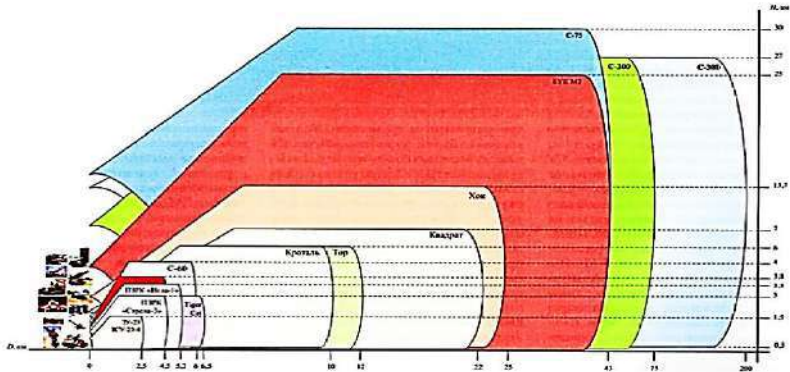


Рис. 2– Параметры зон поражения (обстрела) основных средств ПВО.

Из рис. 2 видно, что поражение целей ПЗРК «Игла» начинается с 500-800м, ЗРК «Тор» – 800м. Что существенно ограничивает их применение против низколетящих малых БПЛА. На меньших высотах ракета не успевает сделать маневр и «встроиться» на управляющий радиолуч.

Предлагается создать комплекс для борьбы с малыми БПЛА на высотах до 3000м в калибре 80мм. В качестве ракет в данном калибре применить неуправляемые авиационные ракеты (НАР) С-8, которые могут иметь различные боевые части: осколочно-фугасной, шрапнельные с несколькими тысячами готовых поражающих элементов и др. Эффективность комплекса будет достигаться за счет поражения БПЛА осколочным полем, а также за счет стрельбы залпом из нескольких ракет (перекрытие осколочных полей).

Основные причины создания комплекса:

1. Небольшие высоты полета малых БПЛА, что существенно ограничивает применение существующих комплексов с управляющим радиолучом для поражения ракетным вооружением;
2. Несопоставимо по сравнению с БПЛА высокие цены на разработку и производство как существующих малоэффективных против малых БПЛА ЗРК, ЗРПК, ЗСУ, ЗУР, так и комплексов радиоэлектронной разведки и радиоэлектронного поражения (подавления);
3. Высоко подготовленные специалисты, требующиеся для эксплуатации и обслуживания существующих комплексов;

4. Боевая и экономическая эффективности. Стоимость боекомплекта из НАР в разы дешевле ракет, применяемых в зенитных ракетных подразделениях.

Плюсы предлагаемого комплекса:

1. Низкая стоимость боекомплекта;
2. Применение серийно производимых изделий – простота в служебном обращении, высокая надежность, максимальная унификация с изделиями на базе НАР С-8;
3. Применение залпа против большого количества ложных целей и групп (роев) БПЛА как средств преодоления ПВО;

Минусы предлагаемого комплекса:

1. Необходимость разработки неконтактного взрывателя с датчиками обнаружения цели.

Литература:

1. Брагунцов Е.Я., Назаров С.С., Цыбрий А.И. и др. Анализ типов малых БПЛА и подбор наиболее целесообразных и доступных на переднем крае обороны средств их поражения // Наука. Промышленность. Оборона.: труды XXIV Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. / коллектив авторов; под редакцией А. В. Гуськова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023;

2. Брагунцов Е.Я., Назаров С.С., Цыбрий А.И. и др. Исследования по определению необходимых характеристик боеприпасов к гранатометам для борьбы с малыми БПЛА с высотой полета до 300м // Наука. Промышленность. Оборона: труды XXIV Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. / коллектив авторов; под редакцией А. В. Гуськова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023;

3. Тикшаев В.Н., Барвиненко В.В. Проблема борьбы с беспилотными летательными аппаратами и возможные пути ее решения // Военная мысль. 2021. №1. С. 125–132.;

4. Дзен: СОВБЕЗ [сайт] / Доклад экспертов ВВС России: Существующие средства ПВО не эффективны против малых БПЛА – URL: <https://dzen.ru/a/YhJBEQUg-xVjO4uS> (дата обращения 23.10.2023).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО НАДУВНОГО УГОЛКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ С ДЛИНОЙ СТОРОНЫ 80 СМ

А.В. Гуськов, В.Н. Бойченко, М.С. Хребтова
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Vladislava1400@mail.ru

Разработка воздушного надувного углового отражателя с длиной стороны 80 см, действующего в миллиметровом диапазоне длин волн электромагнитного излучения, для защиты кораблей среднего и большого водоизмещения. Произведен расчет, доказывающий, какой отражатель имеет лучшие характеристики.

Development of an air inflatable corner reflector with a side length of 80 cm, operating in the millimeter wavelength range of electromagnetic radiation, to protect ships of medium and large displacement. A calculation has been made to prove which reflector has the best characteristics.

В настоящее время в связи с развитием ракет с головками самонаведения (ГСН) возрастает потребность в создании эффективных пассивных помех. Так как не всегда целесообразно использовать разбрасываемое снаряжение (углеродно-волоконистые материалы, диполи и т.д.), для защиты кораблей применяются угловые отражатели (УО).

Угловой отражатель — устройство, предназначенное для изменения направления и интенсивности потока энергии. Оно представляет собой конструкцию в виде трёх элементов со взаимно перпендикулярными отражающими плоскостями, жестко связанными между собой. Важнейшим свойством угловых отражателей является то, что большая доля высокочастотной энергии, падающей на них с любого направления в пределах внутреннего угла, отражается обратно, в сторону облучающей радиолокационной системы (РЛС). На РЛС появляется сигнал, аналогичный возможной реальной цели. Указанное явление называется эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) [1].

Наибольшая интенсивность рассеяния энергии радиоволн получается, когда грани уголка строго взаимно перпендикулярны. УО должны изготавливаться весьма тщательно и требуют осторожного обращения, так как отклонение от прямого угла всего лишь в 1° уменьшает ЭПР отражателя приблизительно в 5 раз.

Менее чувствительны к погрешностям изготовления угловые отражатели с треугольными гранями, имеющие более широкую и равномерную диаграмму направленности и большую жесткость граней. Поэтому их применяют чаще, несмотря на то что для получения той же

ЭПР требуется несколько больше материала, чем на УО с квадратными гранями.

Отражатели с секторными и квадратными гранями имеют характеристики, аналогичные характеристикам уголкового отражателя с треугольными гранями. На рисунке 1 представлены варианты трехгранных уголкового отражателей с гранями разной формы.

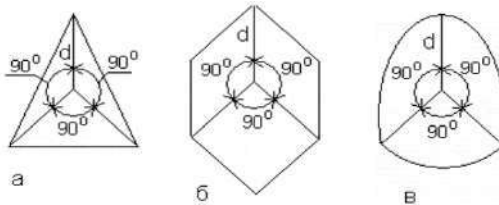


Рис. 1 – Варианты трехгранных уголкового отражателей
а – треугольный УО, б – квадратный УО, в – секторный УО

При анализе ЭПР уголкового отражателей построенные графики значений имеют вид лепестковой функции – индикатрисы рассеяния. В зависимости от угла падения сигнала можно получить несколько основных лепестков: 1 – максимальная ЭПР, 2 и 3 – минимальные ЭПР.

Расчет характеристик индикатрис рассеяния трехгранных уголкового отражателей для сторон граней с длиной a , равной 80 см представлены в таблице 1. Расчет проводился по методике, приведенной в [2].

Как видно из таблицы 1, наибольшей ЭПР в максимуме основного лепестка обладает уголкового отражатель с квадратными гранями, однако он имеет наиболее узкие индикатрисы в обеих плоскостях. Наиболее широкие индикатрисы обеспечивает отражатель с треугольными гранями, что и определяет его преимущественное использование, несмотря на относительно низкое значение σ_m . В соответствии с таблицей 1, с увеличением длины волны уменьшается ЭПР. Наибольшая ЭПР наблюдается при 4 мм длины волны.

Эффективность создания ЭПР уголкового отражателями определяет применение УО в военных условиях в качестве ложных целей и для контроля точности систем самонаведения [3].

Таблица 1 – Результаты расчетов

Тип граней УО	Длина волны, λ , мм	Значение ЭПР, м ²				
		Макси- мальная, σ_m	ЭПР 1-го бок. лепестка, σ_1	ЭПР 2-го бок. лепестка, σ_2	ЭПР 3-го бок. лепестка, σ_3 левый	ЭПР 3-го бок. лепестка, σ_3 прав ый
Квадратные	4	$9,65 \cdot 10^{11}$	$3,2 \cdot 10^{11}$	$6,4 \cdot 10^{11}$	$1,14 \cdot 10^{11}$	$1,43 \cdot 10^{11}$
	8	$2,41 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	$2,86 \cdot 10^{10}$	$3,57 \cdot 10^{10}$
	10	$1,54 \cdot 10^{11}$	$5,1 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1,83 \cdot 10^{10}$	$2,29 \cdot 10^{10}$
	30	$1,71 \cdot 10^{10}$	$5,7 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$2,03 \cdot 10^9$	$2,54 \cdot 10^9$
Треугольные	4	$1,1 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^{10}$	$3,57 \cdot 10^{10}$
	8	$2,7 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	$7,1 \cdot 10^9$	$8,93 \cdot 10^9$
	10	$1,7 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$2,6 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^9$	$5,72 \cdot 10^9$
	30	$1,9 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^9$	$5,1 \cdot 10^8$	$6,35 \cdot 10^9$
Секторные	4	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^{10}$	$8,81 \cdot 10^{10}$
	8	$3,6 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	$9,9 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{10}$
	10	$2,3 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{10}$	$6,3 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,41 \cdot 10^{10}$
	30	$2,6 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^9$	$1,57 \cdot 10^9$

Характеристики уголкового отражателя используются морскими судами для обхода противовоздушной обороны противника, так как уголкового отражателя, сбрасываемый на воду, создает отраженный сигнал, превышающий сигнал корабля, позволяя направить радиолокатор противника на уголкового отражателя, отвлекая от цели. [4]

Так же уголкового отражателя можно использовать не только на море, но и на суше, имитируя ЭПР самолета.

Была смоделирована конструкция НУО, состоящая из надувного уголкового отражателя, парашюта и строп, предназначенная имитации ЭПР корабля (рисунок 2).

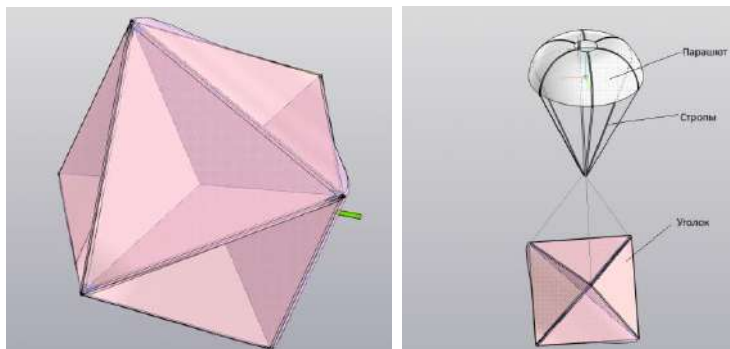


Рис. 2- Конструкция НУО

Угловый отражатель сбрасывается на парашюте с ракет или борта на воду, затем отраженный от него сигнал захватывается центром самонаведения ракетной установки, и осуществляется пуск ракеты. При подлете к угловому отражателю ракета активирует радиовзрыватель боевого заряда. При подлете к угловому отражателю ракета активирует радиовзрыватель боевого заряда.

Вывод

В результате расчета характеристик индикатрис рассеяния трехгранных угловых отражателей для сторон 80 см, получен максимальный ЭПР для треугольных граней, равный $1,1 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$, причем реальный ЭПР корабля большого водоизмещения составляет около $2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$. Это означает, что предлагаемый УО будет эффективен в качестве ложной цели при защите надводных кораблей.

К недостаткам НУО можно отнести то, что они неэффективны против современных и перспективных ракет с ГСН, но могут применяться против ракет времен холодной войны, которые до сих пор являются наиболее распространенным вариантом вооружения.

Литература:

1. Манаев, Е.И. Основы радиоэлектроники / Е.И. Манаев. - М.: ЛИБРОКОМ, 2013. - 512 с.
2. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М., "Сов. Радио", 1975, - 248 стр.
3. Курс лекций по дисциплине «Основы управления средствами поражения»
4. Применение инженерных средств защиты от высокоточного оружия с целью защиты боевой техники// Рамблер URL: https://studbooks.net/80963/tehnika/primenenie_inzhenernyh_sredstv_zaschit

РАЗРАБОТКА ДВУХРЕЖИМНОГО РДТТ ДЛЯ БЕТОНОВОЙНОЙ НАРС С-13 С ПОВЫШЕННОЙ ДАЛЬНОСТЬЮ БОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В.В. Романов², Р.В. Демин², Е.Я. Брагунцов^{1,2}, А.Б. Мурзаева¹

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт прикладной физики,

г. Новосибирск, alina-murzaeva7@mail.ru

В данной статье представлены результаты разработки дальнобойной бетонобойной НАРС-13 с использованием двухрежимной двигательной установки. Пробивное действие ракеты на больших дальностях обеспечивается за счет применения дополнительного доразгонного двигателя, который обеспечивает приращение скорости ракеты в момент встречи с преградой до уровня необходимого для пробивного действия.

This article presents the results of the development of the long-range concrete-breaking NARS-13 using a dual-mode propulsion system. The penetrating effect of the missile at long ranges is ensured by the use of an additional pre-acceleration engine, which provides an increase in the speed of the missile at the moment of meeting an obstacle to the level necessary for the penetrating.

Штатная бетонобойная ракета С-13Т имеет следующие характеристики (табл. 1) [2]:

**Таблица 1 – Основные тактико-технические характеристики
ракеты С-13Т**

Калибр, мм	122/90
Масса ракеты, кг	75
Скорость ракеты, м/с	500
Дальность пуска, м	1100-4000
Масса боевой части (БЧ), кг	21+16,3
Масса ВВ, кг	1,8+2,7 кг
Толщина пробиваемого железобетона, мм	1000

В рамках массогабаритных ограничений существующей ракеты С-13Т можно выделить следующие способы модернизации ракеты, обеспечивающих достижение поставленной цели:

- увеличение дальности за счет оптимизации аэродинамической формы ракеты;
- увеличение скорости и дальности за счет совершенствования двигателя.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день увеличение дальности полета боеприпасов за счет оптимизации аэродинамической формы ракеты исчерпало свои возможности.

Что касается увеличения скорости и дальности пуска ракеты за счет совершенствования двигателя, то в АО «ИПФ» такая работа проведена. Проведённое исследование по созданию дальнобойной бетонобойной НАР С-13Т путем повышения скорости за счет применения высокоэнергичного РДТТ показали её работоспособность на дистанции до 6 км. Этого недостаточно. В связи с чем, возникает необходимость разработки бетонобойной НАР с использованием двухступенчатой двигательной установки, пробивное действие которой на больших дальностях обеспечивается за счет дополнительного доразгонного (маршевого) двигателя. При этом доразгонный двигатель обеспечивает доразгон ракеты до скорости необходимой для обеспечения пробивного действия.

В данной работе приводятся результаты разработки такой ракеты и ее характеристики.

Спроектированная ракета изображена на рисунке (1-3), основные тактико-технические характеристики двухступенчатой НАР представлены в таблице 2.

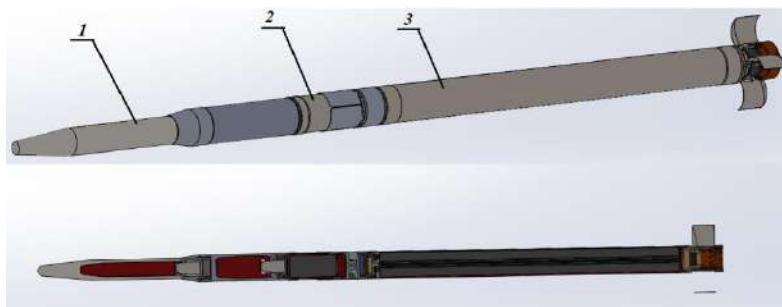


Рис.1 – Двухступенчатая бетонобойная ракета: 1 – тандемная бетонобойная БЧ (от ракеты С-13Т); 2 – доразгонный двигатель; 3- стартовый двигатель

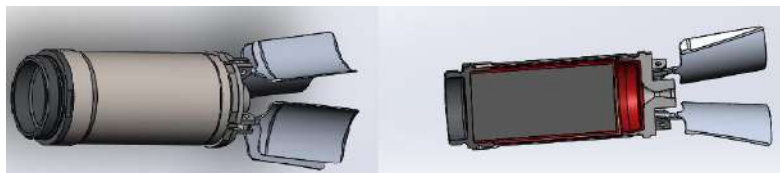


Рис.2 – Доразгонный двигатель (2 ступень)

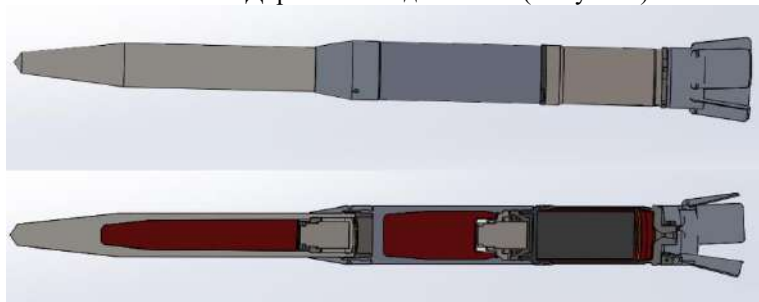


Рис.3 – Бетонобойная боевая часть с доразгонным двигателем

Таблица 2 – Основные технические характеристики двухступенчатой НАР

Характеристики	С-13ТММ
Калибр, мм	122
Длина, мм	2950
Масса ракеты, кг	78,6
Масса БЧ, кг	38
Масса РДТТ, кг	
1 ступень	32
2 ступень	8,6
Эффективность	Пробивает 6 м грунта и 1 м железобетона, площадь разрушения ВПП 20 м ²
Дальность полета, км	28
Собственная скорость, м/с	700
Температурный диапазон применения, °С	±60

Внешнебаллистические расчеты показали, что дальность эффективного боевого применения бетонобойных ракет увеличивается до 28 км, при этом обеспечивается возможность боевых действий самолетов и вертолетов в условиях применения противником средств ПВО (переносных ПЗРК). Пробивное действие ракеты по железобетону рассчитывалось по методике, приведенной в [1].

Литература:

1. Водопьянов М.Я. Теория и расчёт артиллерийских снарядов: Лабораторный практикум / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2002.- 158 с.
2. Оружие России. М.: Изд. ООО «Военный парад», 2006г.- 1014 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ БОЕПРИПАСОВ ЗАЖИГАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ БПЛА

**В.В. Романов², Р.В. Дёмин², Е.Я. Брагунцов^{1,2},
В.Е. Бессонов^{1,2}, С.С. Назаров^{1,2}, А. И. Цыбрий^{1,2}**

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт прикладной физики,

г. Новосибирск, Kitabateik@gmail.com

В данной статье рассмотрены свойства составов для снаряжения зажигательных боеприпасов к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Проведена проверка зажигающего действия выбранных зажигательных составов.

This article discusses the properties of compositions for the equipment of incendiary ammunition for unmanned aerial vehicles. The test of the incendiary action of the selected incendiary.

В качестве средств поражения в БПЛА используются боеприпасы различного назначения. Среди них недостаточно представлены боеприпасы зажигательного действия, несмотря на то, что в Российской армии имеется огромный опыт их применения. Известно, что в годы Великой отечественной войны на снабжении Красной Армии находились и широко применялись зажигательные боеприпасы, снаряженные зажигательными смесями «КС», №1 и №3 обладающими хорошей текучестью и вязкостью, что позволяет данным смесям разливаться и прилипать к различным поверхностям, в том числе и вертикальным. При попадании данных горящих зажигательных смесей на технику

происходит прилипание смесей к поверхностям техники, в том числе к навесному оборудованию, смотровым щелям и стеклам. При горении смеси выделяют большое количество тепла, сильно разогревая части техники, в том числе элементы силовой установки, поджигает топливные баки, что приводит к уничтожению техники. Выделяющийся при горении дым дополнительно ослепляет экипаж поражаемой техники. [1]

Зажигательная смесь «КС» представляет собой смесь белого фосфора и трисульфида тетрафосфора P_4S_3 , такой состав позволяет данной зажигательной смеси самовоспламеняться при контакте с воздухом. Смесей №1 и №3 являются смесями топлива (керосин, лигроин, бензин) с машинным маслом и загустителем ОП-2. Загуститель ОП-2 является веществом известным как нафтенат алюминия, который входит в состав загустителя М1 разработанного в США для напалма.

Продолжительность горения смесей «КС», №1 и №3 от 40 секунд до 3х минут. [2]

Состав «КС» вследствие наличия запретов на применение белого фосфора в настоящее время к применению не рекомендуется. Исходя из исторического опыта применения зажигательных смесей целесообразно использовать зажигательные составы близкие к составам №1 и №3 в качестве наполнителей для зажигательных боеприпасов к БПЛА.

Данная работа проведена с целью оценки возможности создания для БПЛА боеприпасов массового применения, оснащенных различными недорогими зажигательными составами, доступными в объемах достаточных для организации массового производства и близкими по составу к апробированным составам №1 и №3.

Конструктивно-компоновочная схема боеприпаса приведена на рис. 1.

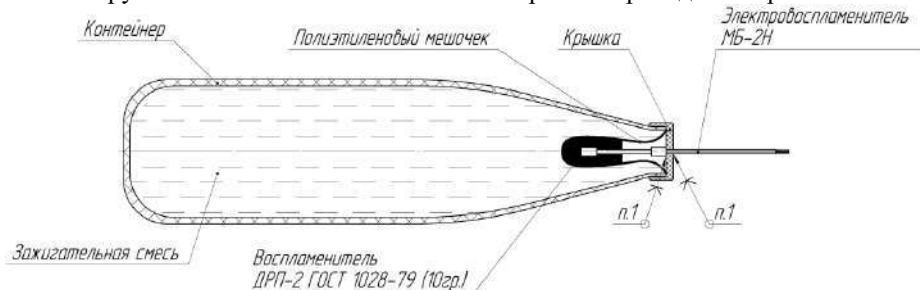


Рис.1 – Эскиз зажигательного боеприпаса

Зажигательный боеприпас представляет собой контейнер (пластиковая бутылка), заполненная зажигательным составом. Диспергирование произведено с помощью пороха ДРП-2 ГОСТ1028-79.

Воспламенение осуществлялось с помощью электровоспламенителя МБ-2Н.

Использовался следующий состав зажигательных смесей (близких по свойствам к составам №1 и №3):

«Коктейль Молотова» (на 1 объем 2/3 бензина и 1/3 машинного масла).

«Напалм» (5-метилциклогексадиен-1,3 1/1 смешивают с бензином);

Испытания зажигательных боеприпасов проведено в АО «ИПФ» на стенде огневых стендовых испытаний (ОСИ). В качестве материалов для контроля процесса зажжения использовался деревянный ящик от боеприпасов и ветошь из хлопчатобумажных тканей.

На рисунке 2 показан процесс горения коктейля «Молотова».

Коктейль «Молотова» воспламенился, при сгорании контейнера разлился по поверхности, горел стабильно и легко потушился с помощью воды. Разбрызгивания не происходило. Деревянный ящик и ветошь воспламенились.



Рис.2 – Процесс горения коктейля «Молотова»

На рисунке 3 приведен процесс горения боеприпаса с «напалмом».

«Напалм» воспламенился. Вышибным зарядом разбросался состав. Исследовалось влияние перемещения и разливов смеси на процесс горения. Процесс горения очагов и при перемещении смеси не затухал даже на вертикальных поверхностях. Процесс горения длился 24 минуты

и горел очагами, тушился водой затруднительно. Деревянный ящик и ветошь воспламенились, горели стабильно.



Рис.3 – Процесс горения «Напалма»

Сравнение процесса горения смесей показывает, что в качестве наполнителя зажигательного боеприпаса целесообразно использовать состав типа «напалм».

Преимущества:

- 1 Горит стабильно.
- 2 Разбрызгивается, прилипает, продолжает гореть и становится новым очагом воспламенения.
- 3 Горит долго.
- 4 Тушится затруднительно.
- 5 Недорогой и доступный состав.

Литература:

1. Инструкция по применению зажигательных бутылок – М.: Воениздат НКО СССР, 1941. – 25 с.
2. Ардашев А. Н. Огнемётно – зажигательное оружие. – М.: АСТ/Астрель, 2001. – 288 с.

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

М.П. Девушкин¹, А.А. Плуман¹, А.С. Юношев²

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН,

г. Новосибирск, e-mail: mdevushkin_1999@mail.ru

Научный руководитель: Юношев А. С., к.ф.-м.н.

В данной работе было исследовано влияние порошков алюминия на скорость детонации ЭмВВ в диапазоне плотностей от 0,5 – 1,2 г/см³. Было установлено, что добавление порошка ПАП-2 в плотности 0,5 г/см³ увеличивает скорость детонации, а порошок АСД-4 уменьшает скорость детонации. В диапазоне плотностей 1-1,2 г/см³ было замечено, что порошки алюминия не успевают прогреться в зоне химической реакции, что привело к уменьшению скорости детонации. Порошок талька во всех плотностях уменьшал скорость детонации.

In this work, the effect of aluminum powders on the detonation rate of EEs in the density range from 0.5 – 1.2 g/cm³ was studied. It was found that the addition of PAP-2 powder at a density of 0.5 g/cm³ increases the detonation rate, and ASD-4 powder reduces the detonation rate. In the density range 1-1.2 g/cm³, it was noticed that aluminum powders do not have time to warm up in the chemical reaction zone, which led to a decrease in the detonation rate. Talcum powder in all densities reduced the detonation rate.

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) являются основными промышленными ВВ и имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными взрывчатыми веществами. Алюминиевый порошок является одним из инертных материалов который добавляют в различные взрывчатые вещества, чтобы повысить мощность и метательную способность [5]. Детонационные характеристики зачастую непредсказуемы, так как это зависит от состава ВВ, в который добавляют алюминий, размер алюминиевых частиц, количеством добавляемого порошка и т. д. Для большинства бризантных ВВ добавление порошка алюминия не приводит к увеличению скорости детонации или давления. Однако, время действия высокого давления на заряд может значительно возрастать, что например: используется в обработке материалов взрывом.

Некоторые промышленные производства используют алюминизированные ВВ [5]. Добавление алюминия крайне мало и их детонационные характеристики малоизучены. Перечень работ, в которых ранее исследовалось влияния алюминия на ЭмВВ немногочисленный [1-4]. В данных работах изучались составы с плотность 1,0 г/см³ и выше, что актуально при ведении горных работ. Отмечается, что давление в

окружающей среде оказывается несколько больше, а скорость детонации всегда меньше.

В данной работе исследовалось изменение скорости детонации эмульсионного ВВ с добавлением двух видов порошков алюминия в плоских слоях с разной толщиной зарядов. Основной эмульсионной матрицы в данной работе является: аммиачная селитра (68%), натриевая селитра (11%), вода (15%), индустриальное масло (4%) и эмульгатор сорбитан моноолеат (2%). В качестве сенсibiliзатора и регулятора плотности использовались полимерные микробаллоны Exprancel 461 DET 40. Исследовались ЭмВВ с плотностями 0,5 г/см³, 1,0 г/см³, 1,2 г/см³. В качестве добавок использовались два порошка алюминия ПАП-2 и АСД-4. Для полного понимания влияния добавок, также использовался порошок талька – материал со схожей плотностью и близким к алюминию акустическим импедансом.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в эмульсионном взрывчатом веществе с плотностью 0,5 г/см³ с добавлением порошка алюминия ПАП-2 за фронтом ударной волны чешуйки интенсивно деформируются и перемешиваются с ударно-сжатой пористой эмульсией. Это приводит к увеличению площади контакта реагирующих компонентов, что в совокупности с однородно прогретым алюминием дает увеличение скорости его реакции, а затем и увеличивается скорость детонации.

Порошок АСД-4 из-за частиц в форме сфер не успевает однородно прогреться это приводит к уменьшению площади контакта реагирующих компонентов, что в совокупности дает уменьшение скорости реакции из-за чего скорость детонации уменьшается. При плотности 1,2 г/см³ и 1,0 г/см³ расстояние между микробаллонами значительно больше, чем при плотности 0,5 г/см³, поэтому интенсивности «горячих точек» образующихся после сжатия микробаллонов не хватает, чтобы прогреть значительное количество алюминия, поэтому скорость детонации в этих плотностях снижается.

Добавление талька во всех плотностях значительно увеличивает критическую толщину по сравнению с алюминием, и всегда уменьшает скорость детонации.

Литература:

1. *Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J.* Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal practices // Shock Compression of Condensed Matter. 2011. P. 267– 270.
2. *Bednarczyk E., Maranda A., Paszula J., Papliński A.* Studies of effect of aluminium powder on selected parameters of emulsion explosive

sensitized with microballoons // Polish J. Chem. – 2016. – Vol. 70, N 1. – P. 41-50.

3. *Lefrancois A., Grouffal J-Y., Bouinot P.* Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion// Proc. Twelfth Int. Det. Symp. – 2002. – P. 432– 439.

4. *Mishra A.K., Agrawal H., Raut M.* Effect of aluminum content on detonation velocity and density of emulsion explosives // Journal of Molecular Modeling – 2019.

5. Patent 2 452 916 C1 Russian Federation. Method of application of aluminum in compositions and charges of explosives / *O.V. Panchishin.* – 2010147669/11; declared 22.11.2010, published 10.06.2012, Bull. 16. – P. 1–

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕНИЯ В УЗЛАХ УСТАНОВКИ РЕЗКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

К.М. Зубашевский

**Новосибирский государственный технический университет,
Конструкторско-технологический филиал института
гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск, zubaschewsky@yandex.ru
Научный руководитель: Гуськов А.В., д.т.н., доцент**

В статье рассмотрен вопрос подготовки радиоактивных отходов к размещению в контейнерах, а также показана актуальность исследования узлов сухого трения установки для резки отработанных тепловыделяющих сборок.

The article considers the issue of preparation of radioactive waste for placement in containers and shows the relevance of the study of dry friction units in the spent fuel assemblies cutting machine.

На настоящий момент количество отходов атомной энергетики превышает возможности по их использованию. В связи с этим возникает необходимость либо их уничтожить, либо хранить для будущего использования. Так как безопасное уничтожение ядерных отходов в рамках нашей планеты не представляется возможным, остается их хранить наиболее безопасными способами, например, в подземных захоронениях [1]. Так как объемы пространств для хранения ядерных отходов ограничены в связи с технологическими трудностями (сложно и дорого построить хранилище большой вместимости на глубине порядка

0,5-10 км под землей), то сразу появляется проблема измельчения твердых отходов.

Перед размещением радиоактивных отходов (РАО) в захоронениях и хранилищах их подвергают кондиционированию – подготовке к захоронению. Под этим названием понимают, в общем случае, перевод жидких и твердых отходов в форму, пригодную для хранения, транспортировки и захоронения. Критериями выбора способа кондиционирования являются: химическая, тепловая и радиационная стойкость, взрывобезопасность, механическая прочность конечного продукта, отсутствие газовыделения, а также экономические показатели.

Для жидких отходов кондиционирование заключается в их концентрировании, отверждении концентратов и размещения в контейнеры. Для твердых РАО – в сжигании, прессовании, фрагментации, нанесении защитных покрытий и размещении в контейнерах.

Чтобы максимально использовать полезный объем контейнера, нужно максимально уменьшить размеры твердых отходов, однако сложно сколь угодно уменьшать этот размер – он ограничивается экономическими, технологическими возможностями, а также безопасностью.

Как правило, емкости для ядерных отходов имеют вполне определенные размеры и другие конструктивные параметры [2], что также определяет возможные размеры частиц твердых ядерных отходов.

Среди применяемых способов измельчения ядерных отходов, в частности, отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС), одним из наиболее безопасных является рубка их в специальной установке с помощью ножей [3]. Для обеспечения возвратно-поступательного движения с необходимыми параметрами отклонений в установке применяются узлы сухого трения, состоящие из массива твердосплавных элементов и плоской стальной направляющей. Количество элементов составляет около 2000 шт.

При работе установки спустя различное время (от 3 до 6 месяцев работы установки резки) происходит износ трущихся поверхностей, что приводит к перекосу подвижного ножа и, как следствие, его столкновению с неподвижным ножом, из-за чего их режущие кромки разрушаются, приводя к выводу установки резки из строя. После этого блок подвижного ножа, а также неподвижный нож извлекаются из установки и заменяются на новые. Так как на установке ведется переработка радиоактивных материалов, операция замены ее частей является опасной для персонала.

Из вышесказанного следует, что узел трения установки для резки ОТВС является критически важным элементом, отказ которого приводит

не просто к отказу установки, но создает опасность для персонала. Таким образом, если повысить надежность этого узла, возрастет и надежность всей установки, а также уменьшится количество замен ножевого блока, что приведет к снижению как радиоактивной опасности, так и экономических затрат на рабочий блок и его замену.

Особенностью узла трения описываемой установки для резки являются отсутствие смазки (то есть, трение сухое) и высокая нормальная нагрузка на пары трения. Авторами не обнаружены научные работы, в которых изучались бы износостойкость и другие трибологические параметры пар сухого высоконагруженного трения, состоящих из стали и твердого сплава.

В настоящее время на базе конструкторско-технологического филиала института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН ведутся исследовательские работы по изучению износостойкости различных пар трения сталь-твердый сплав при дополнительном нагреве. Результаты работ представлены в [4], сейчас они продолжаются, готовятся другие публикации.

Литература:

1. Зубашевский К. М. Методы сегментации радиоактивных отходов / К. М. Зубашевский, О. И. Стояновский ; [науч. рук. А. В. Гуськов] // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб.–4дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 9. – С. 131–135. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-4297-5.

2. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности / В. Т. Сорокин, А. В. Демин, В. В. Кашеев [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2013. – № 2(68). – С. 15-22.

3. Патент № 2732279 С1 Российская Федерация, МПК G21C 19/00. Установка для резки отработавших тепловыделяющих сборок : № 2019132770 : заявл. 15.10.2019 : опубл. 15.09.2020 / А. Ф. Черендин, В. В. Ляхов, В. Г. Галуцкий, И. М. Котов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГиЛ СО РАН).

4. Стояновский, О. И. Износ пар сухого трения, состоящих из высокоуглеродистых хромованадиевых сталей и твердых сплавов / О. И. Стояновский, В. Г. Галуцкий, Д. И. Котов // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63, № 2(372). – С. 166-174. – DOI 10.15372/PMTF20220215.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ОБЛИЦОВКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ КУМУЛЯТИВНЫХ ПЕРФОРАТОРОВ

А.О. Игноватова, М.С. Гречухина, В.А. Воронцова
Самарский государственный технический университет
г. Самара, ignovatovalleya@yandex.ru
Научный руководитель: М.С. Гречухина,
к.т.н., старший преподаватель

В представленной работе предлагается увеличивать пробивное действие зарядов кумулятивных перфораторов, применяемых для вторичного вскрытия пластов, содержащих нефть или газ, за счет применения порошковых кумулятивных облицовок. В ходе исследования определяется перспективный состав, при испытании которого были показаны результаты по увеличению диаметра пробития отверстия.

In the present paper, it is proposed to increase the penetration effect of charges of shaped perforators used for secondary opening of formations containing oil or gas through the use of powder shaped facings. In the course of the study, a promising composition is determined, during the testing of which the results were shown to increase the diameter of the hole penetration

В настоящее время широкое распространение получила проблема улучшения показателей пробития пластов залежей нефти, позволяющих наиболее удобным образом добыть полезное ископаемое. Для этого применяются перфорационные системы, представляющие собой заряды, основанные на эффекте кумуляции [1]. Для повышения эффективности действия зарядов кумулятивных перфораторов предложено использовать три рецептуры материала кумулятивной облицовки (КО), представленных в табл. 1.

Таблица 1 – Характерный состав кумулятивных облицовок

№	Состав кумулятивной облицовки	Масса КО, г
1	Al + Ni + W	30,2
2	Cu + Pb + масло индустриальное	36,4
3	Смесь Cu-Pb + Ti-B	36,2

Кумулятивные облицовки изготовлялись на прессе ИП-2500М с давлением прессования 45000 кг/см². Характерный внешний вид готовых облицовок представлен на рис. 1.

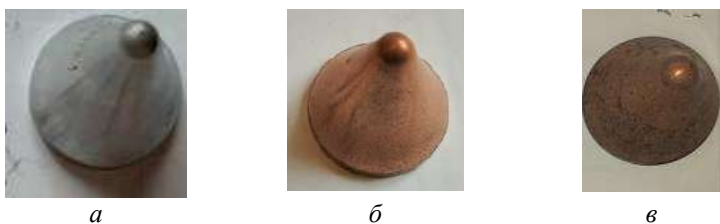


Рис. 1 – Внешний вид изготовленных кумулятивных облицовок:
a – состав Al + Ni + W; *б* – состав Cu + Pb + масло индустриальное;
в – смесь Cu-Pb + Ti-B

После изготовления КО проводилась сборка кумулятивного заряда (КЗ). Предварительное формирование выемки под кумулятивную облицовку осуществлялось при удельном давлении прессования 450 кг/см². После формирования выемки устанавливалась облицовка. Окончательное давление прессования - 1500 кг/см². Характерный внешний вид собранного КЗ представлен на рис. 2.

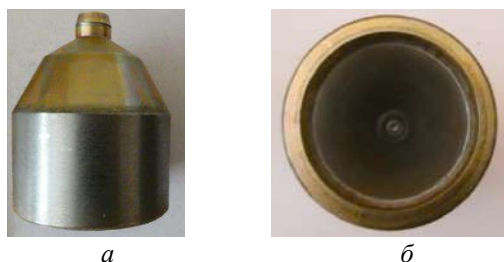


Рис. 2 – Характерный внешний вид готового КЗ:
a – сбоку, *б* – снизу

Для проведения эксперимента были изготовлены пластиковые подставки путем печати на 3D-принтере. Внешний диаметр и высота пластиковой подставки составили 55 и 19 мм соответственно. Внешний диаметр и высота фокусной пластиковой подставки составили 55 и 14 мм соответственно. Мишень устанавливалась следующим образом: в металлическую оболочку с диаметром 100 мм в верхней части и 150 мм в нижней части заливалась смесь цемента и песка с соотношением 1:2. Высота установки составила 700 мм.

Экспериментальное исследование проводилось на учебно-производственной базе «Роща» (ФГБОУ ВО «СамГТУ») в соответствии с методикой АРІ-19В1. На мишень устанавливались пластины из стали толщиной 10 мм, между которыми находилась пластиковая подставка, наполненная водой. Фокусная подставка, на которой устанавливался

заряд, была уложена на пластину. Заряд находился в пластиковой втулке, соединенной с детонирующим шнуром. При проведении экспериментов на повышение эффективности зарядов кумулятивных перфораторов оценивались диаметр и объем формируемых перфорационных каналов [1]. Результаты значений диаметров входного отверстия бетонных мишеней приведены в табл. 2 и на рис. 3.

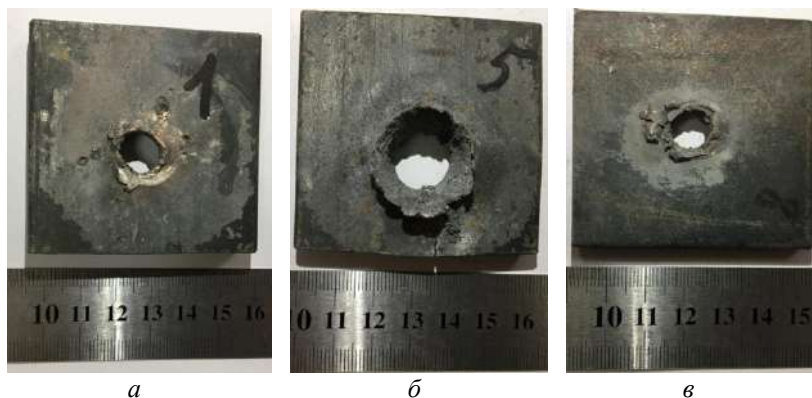


Рис. 3 – Внешний вид входного отверстия пластин после испытаний с КО: а – состава №1, б – состава №2, в – состава №3

Таблица 2 – Результаты значений диаметров входного отверстия бетонных мишеней после испытаний

№ состава кумулятивной облицовки	Длина канала, мм	Диаметр входного отверстия, мм	Объем канала, см ³
1	500	15	39,4
2	190	17	20,49
3	460	15	33,23

По результатам испытания было установлено, что:

- наибольшее значение объема перфорационного канала получено вследствие срабатывания образца № 1;
- наибольшее значение длины канала получено при срабатывании образца № 3;
- наибольшее значение диаметра входного отверстия получено вследствие испытания макета № 2.

Показатели результатов испытания заряда с составом №2 имеют наибольший диаметр входного отверстия, по сравнению с результатом

экспериментов с зарядами №1 и №3 – разница составляет всего 18 %, что является незначительным.

Значение длины канала испытания №2 в среднем отличается от остальных на 60 %, поэтому наибольшая эффективность действия наблюдается у зарядов с КО, изготовленного из состава Pb+Cu+индустриальное масло. Материал облицовки в зарядах кумулятивных перфораторов оказывает огромное влияние на результаты действия зарядов.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что повысить эффективность действия кумулятивных перфораторов при вскрытии пластов можно при помощи применения облицовки, полученной методом прессования из состава Pb+Cu+индустриальное масло.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Литература:

1. Брылов С.А., Грабчак Л.Г., Комащенко В.И. Горноразведочные и буровзрывные работы: учебник. – М.: Недра, 1989 -287 с

РАЗРАБОТКА 40-ММ ВЫСТРЕЛА ДЛЯ ПОДСТВОЛЬНОГО ГРАНАТОМЕТА ГП-25

А.В. Гуськов, М.С. Хребтова, К.А. Останина
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, a.guskov@corp.nstu.ru
Научный руководитель: Гуськов А.В., д. т. н., доцент

Модернизация конструкции выстрела необходима для снижения отдачи после срабатывания метательного заряда, тем самым, повысится безопасное использование при выстреле на малых дальностях. Произведены расчеты внутренней и внешней баллистики, доказывающие безопасное срабатывание выстрела.

Modernization of the shot design is necessary to reduce the recoil after the propellant charge fires, thereby increasing safe use at short ranges. Internal and external ballistics calculations have been made, proving the safe firing of the shot.

В связи с бурным развитием разнообразных средств разведки особое значение сохраняет маскировка. В текущей Специальной операции наша

армия активно использует разнообразные маскировочные средства и комплекты, при помощи которых обеспечивает защиту различных вооружений, техники и артиллерии. [1] В данной статье будут рассматриваться 40-мм выстрелы для подствольного гранатомета ГП-25. [1]

Всего известно несколько модификаций этого выстрела:

ВОГ-25ИН, инертная модель, необходимая для обучения, а также пробы присоединенного ГП-25;

ВУС-25, учебная модель;

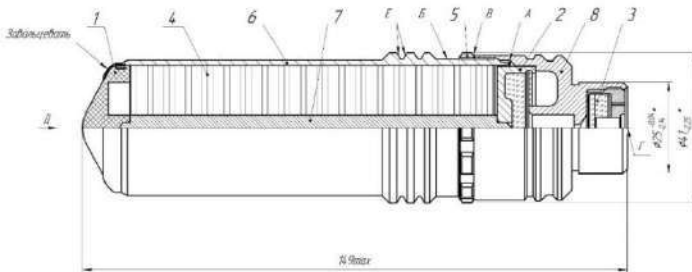
ВОГ-25П, или «подкидывш», с устройством, обеспечивающим «подпрыгивание» заряда для большего радиуса поражения при разрыве; «Гвоздь», для стрельбы слезоточивым газом;

ВДГ-40, для постановки дымовых завес;

АЗС-40, представляющая собой свето-шумовую конструкцию, так же, как и дымовой вариант не летальна;

ВОГ-25ПМ, модернизация, вобравшая в себя опыт лучших образцов предыдущих лет. [2]

Был спроектирован выстрел, в нем были изменены: поршень (для соблюдения условий работы снаряда), обтекатель, пороховой заряд (для уменьшения силы отдачи), увеличение снаряжения, был добавлен толкатель.

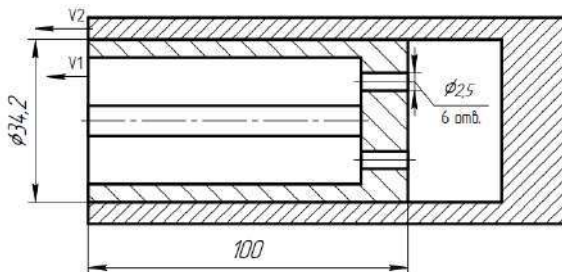


1 – облицовка; 2 – поршень в сборе; 3 – заряд метательный; 4 – изделие ДИ-40; 5 – направляющее кольцо; 6 – корпус; 7 – толкатель; 8 – дно с замедлителем.

Рис.1 – 40 мм выстрел с дымовой гранатой к гранатомету ГП-25.

При изменениях конструкции выстрела изменились и характеристики внутренней и внешней баллистики. Были рассчитаны новые характеристики с помощью методик расчетов. [3]

Для расчета внутренней баллистики была спроектирована схема разделения частей при отстреле. Данная схема представлена на рисунке 2.



V1 – передняя часть выстрела, V2 – нижняя часть выстрела

Рис.2 – Схема разделения частей.

Данная система разделения выстрела имеет два характерных этапа работы:

этап 1 – две части не подвижны, происходит усилие развальцовки (накопление давления);

этап 2 – движение обеих частей относительно друг друга после развальцовки.

На этапе 1 нет перемещений.

Расчет внутрибаллистических параметров при разделении выстрела с целью определения скорости обеих частей снаряда с пороховым зарядом ДРП-1.

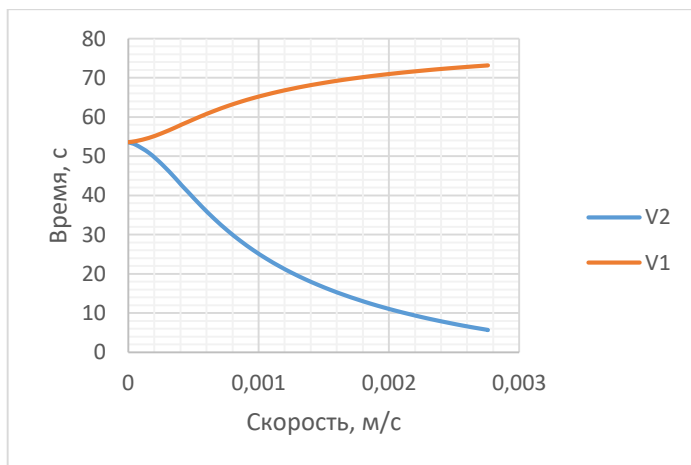


Рис.3 – Скорости частей после разделения выстрела

Таблица 1 – Результаты расчетов пороха

P, кгГ/см ²	T, с	V ₁ -V ₂ , м/с	V ₁ , м/с	V ₂ , м/с	X, мм
5	0	0	53,56	53,56	0
18,75	0,00006	0,97	53,84	52,87	0,03
30,63	0,00016	3,84	54,67	50,83	0,25
39,06	0,00026	7,96	55,87	47,91	0,84
43,03	0,00036	12,82	57,28	44,46	1,87
43,48	0,00041	15,47	58,05	42,58	2,61
43,14	0,00046	17,92	58,76	40,84	3,41
40,87	0,00056	22,88	60,2	37,32	5,45
37,53	0,00066	27,48	61,53	34,05	7,97
33,97	0,00076	31,66	62,75	31,09	10,93
30,6	0,00086	35,42	63,84	28,42	14,29
27,57	0,00096	38,79	64,82	26,03	18
24,91	0,00106	41,82	65,69	23,87	22,04
22,61	0,00116	44,56	66,49	21,93	26,36
20,61	0,00126	47,03	67,2	20,18	30,94
18,87	0,00136	49,27	67,86	18,58	35,76
17,35	0,00146	51,32	68,45	17,13	40,79
16,01	0,00156	53,2	69	15,79	46,02
14,83	0,00166	54,93	69,5	14,57	51,42
13,78	0,00176	56,52	69,96	13,44	57
12,85	0,00186	57,99	70,39	12,39	62,72
12,01	0,00196	59,36	70,78	11,42	68,59
11,25	0,00206	60,63	71,15	10,52	74,59
10,56	0,00216	61,81	71,49	9,69	80,71
9,94	0,00226	62,91	71,81	8,9	86,95
9,37	0,00236	63,94	72,11	8,17	93,29
8,84	0,00246	64,91	72,39	7,49	99,74
8,36	0,00256	65,81	72,65	6,84	106,27
7,92	0,00266	66,66	72,9	6,24	112,9
7,51	0,00276	67,46	73,13	5,68	119,6
7,49	0,00276	67,5	73,14	5,64	120,01

Расчет внешней баллистики производят для оценки высоты, дальности и времени полета гранаты, заданного в исходных данных. И для подбора замедлителя с соответствующим временем задержки.

Для определения траектории полета используем систему дифференциальных уравнений внешней баллистики, учитывая сопротивление воздуха.

Таблица 2 – Текущие значения параметров траектории движения изделия в зависимости от времени.

t, c	$V, м/с$	$\theta, ^\circ$	$x, м$	$y, м$
0	59,7	10	0	1,5
0,1	58,89	9,07	5,85	2,48
0,2	58,12	8,12	11,63	3,36
0,3	57,37	7,15	17,35	4,12
0,4	56,66	6,17	23,02	4,78
0,5	55,98	5,18	28,62	5,34
0,6	55,33	4,17	34,17	5,8
0,7	54,71	3,15	39,66	6,15
0,8	54,12	2,12	45,09	6,4
0,9	53,56	1,08	50,48	6,55
1	53,03	0,02	55,81	6,6
1,1	52,53	-1,04	61,08	6,55
1,2	52,05	-2,12	66,31	6,41
1,3	51,61	-3,2	71,49	6,17
1,4	51,19	-4,29	76,62	5,83
1,5	50,79	-5,39	81,7	5,4
1,6	50,42	-6,5	86,73	4,88
1,7	50,08	-7,61	91,72	4,26
1,8	49,76	-8,72	96,66	3,55
1,9	49,46	-9,84	101,55	2,75
2	49,19	-10,96	106,41	1,86

Исходя из результатов расчета, определена дальность постановки маскирующей завесы 40–60 метров, приведённая на рисунке 4. Этому расстоянию соответствует значение времени 0,9 с согласно рисунку 5.

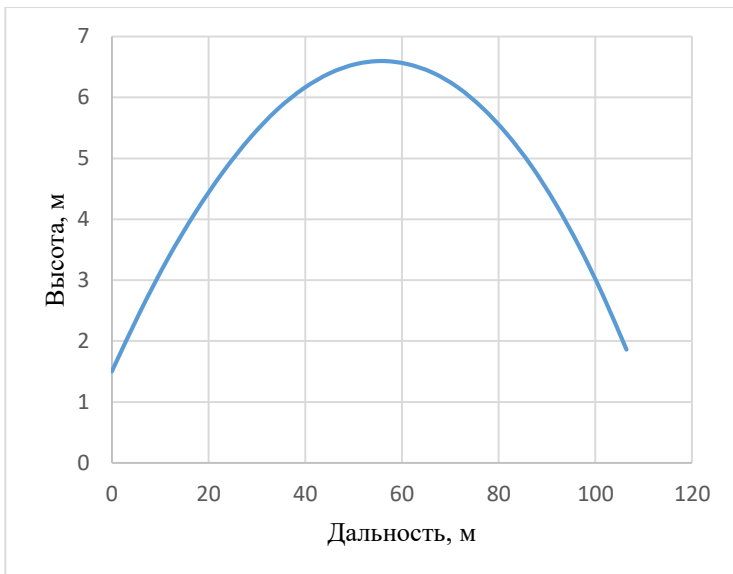


Рис. 4 – Трасектория движения изделия

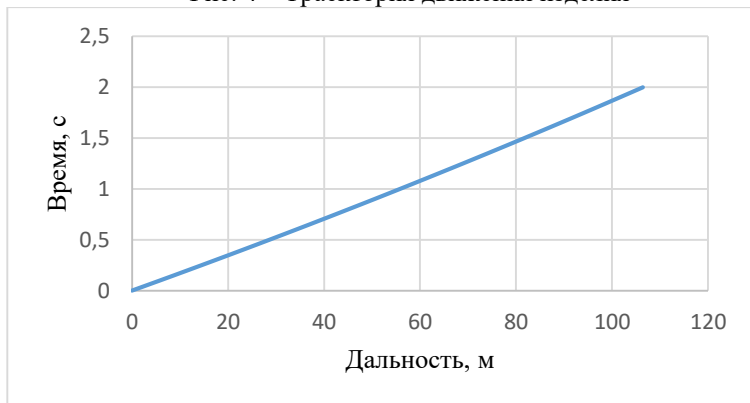


Рис.5 – Зависимость дальности полета снаряда от времени

В ходе проведенной работы были получены результаты расчетов: необходимо установить замедлители со временем задержки 0,9 с.

Литература:

1. Рябов К.А. Средства маскировки техники в Спецоперции [Электронный ресурс] // Военное обозрение: <https://topwar.ru/197736-maskirovka-tehniki-v-specoperacii.html> (дата обращения: 10.11.2023);

2. Иовлев Ю.П. Руководство по 40-мм подствольному гранатомету ГП-25 / М.: Изд-во Ордена Трудового Красного знамени Военное издательство Министерства обороны СССР, 1983. – 1-2с.

3. Гуськов, А. В. Внешняя баллистика : учебное пособие / А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, А. В. Сотенко. – 2-е изд. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 188 с. – ISBN 978-5-7782-3177-1. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/118078> (дата обращения: 10.11.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ К ОСИ

Е.Ю. Потанина

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, potanina.2017@stud.nstu.ru**

**Научный руководитель: Гуськов А.В., д.т.н., доцент, заведующий
кафедрой ГДУ**

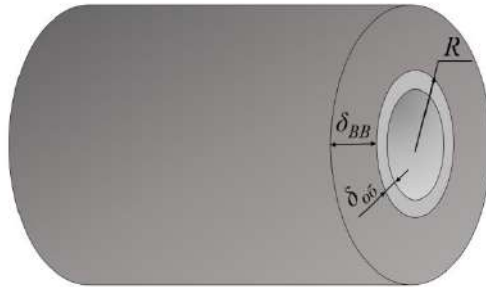
В работе рассмотрена зависимость скорости метания оболочки к оси от геометрических параметров цилиндрического кумулятивного заряда при помощи метода численного моделирования в программном продукте Ansys Autodyn.

The paper considers the dependence of the shell throwing velocity to the axis on the geometric parameters of a cylindrical shaped charge using the numerical simulation method in the Ansys Autodyn software product.

Исследование закономерностей взрывного метания цилиндрической оболочки к оси необходимо для решения задач физики взрыва, например, таких как кумулятивное струеобразование при обжатии цилиндрических оболочек [1-3], ударно-волновое компактирование порошков и материалов [4].

Задачей данной работы является выявление зависимости скорости метания облицовки к оси от геометрических параметров цилиндрического заряда.

Такие параметры как толщина метаемой облицовки $\delta_{об}$, толщина слоя взрывчатого вещества (ВВ) $\delta_{вв}$ и внешний радиус облицовки R полностью определяют геометрию цилиндрического заряда (рисунок 1).



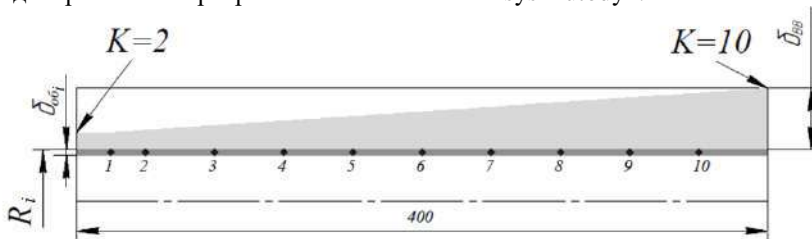
$\delta_{об}$ - толщина метаемой облицовки; $\delta_{ВВ}$ - толщина слоя взрывчатого вещества (ВВ); R - внешний радиус облицовки

Рис.1 – Цилиндрический кумулятивный заряд

Отношение толщины слоя ВВ $\delta_{ВВ}$ к толщине облицовки $\delta_{об}$ характеризует коэффициент наполнения K , чем больше этот коэффициент, тем большую кинетическую энергию получает материал оболочки.

Численное моделирование проводилось для определения влияния совокупности этих параметров на скорость метания облицовки. Соответственно, переменными величинами в этих задачах являлись все три вышеперечисленных параметра (толщина метаемой облицовки, толщина слоя ВВ, внешний радиус облицовки).

На рисунке 2 представлена постановка задачи для численного моделирования в программном комплексе Ansys Autodyn.



Цифрами 1-10 обозначены датчики.

Рис.2 – Постановка для задачи метания оболочки

Для сокращения количества задач численного моделирования коэффициент наполнения в постановке был переменный, т.е. слой ВВ не цилиндрический, а конусный. При этом конусность слоя ВВ была небольшой, что позволяло считать вблизи каждого датчика коэффициент наполнения постоянным.

Всего было проведено 6 постановок задач с разными радиусами R и толщинами облицовок $\delta_{об}$, исходные данные для которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для постановок задач

№	R_i , мм	$\delta_{об}$, мм	$\delta_{вв} \text{ min}$, мм (при $K=2$)	$\delta_{вв} \text{ max}$, мм (при $K=10$)	Y - координата датчиков
1	20	1,7	12,6	40,9	19,2
2	30	1,1	9,5	34,9	29,5
3	40	0,8	7,6	30,1	39,6
4	20	3,7	22,3	65,8	18,2
5	30	2,3	17,9	58,6	28,8
6	40	1,7	14,7	52,5	39,1

Результатом численных расчетов стали зависимости максимальной радиальной скорости облицовки V_u от коэффициента наполнения K для различных постановок задач (рисунок 3).

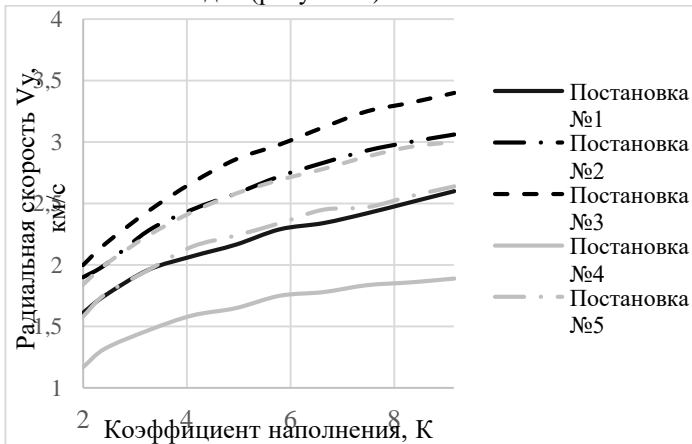


Рис. 3 – Зависимость радиальной скорости облицовки V_u от коэффициента наполнения K для различных постановок задач, приведенных в таблице 1

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- с увеличением коэффициента наполнения K , рост радиальной скорости V_u замедляется;
- с увеличением внешнего радиуса облицовки растет и радиальная скорость метания облицовки, т.к. увеличивается база для ее разгона, под базой понимается расстояние, которое проходит оболочка до схлопывания;

- при одинаковых внешних радиусах облицовки и коэффициентах наполнения большую скорость приобретает та облицовка, которая имеет меньшую толщину.

Таким образом, самые высокие скорости наблюдаются в постановки задачи №3, для которой характерен самый большой радиус $R=40$ мм и самая малая толщина облицовки $\delta_{об} = 0,8$ мм.

Литература

1. Е. Ю. Потанина, А. В. Гуськов/ Кумулятивное струеобразование при взрывном обжатию цилиндрических оболочек// Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения : тез. докл. Всерос. конф., Новосибирск, 18–21 сент. 2023 г. – Новосибирск : ИГиЛ СО РАН, 2023. – С. 27. – 200 экз.

2. А. В. Гуськов, Е. Ю. Потанина, К. Е. Милевский, В. Л. Литвинов Новые подходы к реализации цилиндрической кумуляции// Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов : тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф., Нижний Тагил, 29–30 сент. 2023 г. – Нижний Тагил : УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина; НТИ (филиал) УрФУ, 2023. – 218–224.

3. Е. Ю. Потанина, В. Л. Литвинов, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский. Струеобразование в цилиндрической - Текст : электронный // Аэрокосмическая техника и технологии = Aerospace Engineering and Technology. - 2023. – Т. 1, № 2. – С. 43–57.

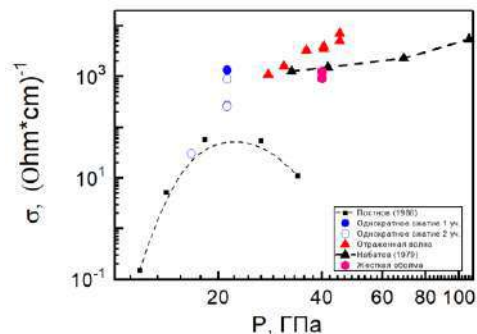
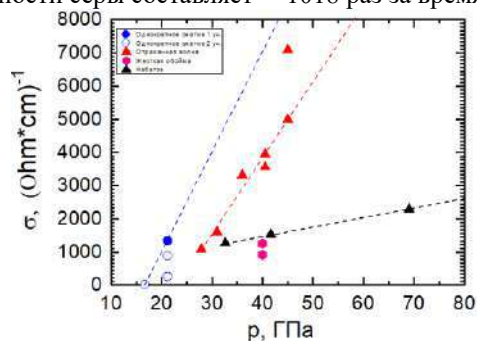
4. Дерibas А.А., Симонов П.А., Филимоненко В.Н., Штерцер А.А. Длинноимпульсное взрывное компактирование алмазного порошка. Физика горения и взрыва, 2000, Т.36, №6, С.91-103.

СЕРА: ПЕРЕХОД ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

С.Д. Гилев¹, Л.Е. Петров^{1,2}

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск

С целью исследования фазовых переходов в сере в области больших давлений и температур проведены эксперименты по измерению электропроводности при ударном сжатии. Найдена электропроводность серы при нескольких значениях давления ударной волны. В области давлений $p > 20$ ГПа обнаружена высокая электропроводность образца $\sim 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, что более чем на порядок величины превышает известные ранее значения [1]. Расхождение с [1] обусловлено, по нашему мнению, с несовершенством измерительной схемы [1], имеющей ограничения на временное разрешение и величину измеряемой электропроводности. Показано, что при ударном сжатии рост электропроводности серы составляет $\sim 10^{18}$ раз за время < 5 нс.



Литература:

1. Постнов В. И., Ананьева Л. А., Дремин А. Н., Набатов С. С., Якушев В. В. Электропроводность и сжимаемость серы при ударном сжатии. ФГВ. – 1986. – Т. 22, № 4. – С. 106–109.

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ КОРРЕКТИРУЕМОЙ БОЕВОЙ ЧАСТИ ДЛЯ БПЛА НА БАЗЕ НАР С-8КОМ

В.В. Романов², Р.В. Дёмин², Е.Я.Брагунцов^{1,2}, А. И. Цыбрий^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт прикладной физики

г. Новосибирск, Kitabateik@gmail.com

В данной статье представлены исследования обоснования возможности разработки корректируемой боевой части для беспилотных летательных аппаратов на базе боевой части неуправляемой авиационной ракеты С-8

This article discusses the rationale for the possibility of developing a correctable warhead of an unguided aircraft missile S-8

В настоящее время с развитием ударных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) расширяется спектр решаемых БПЛА боевых задач.

В качестве сбрасываемого вооружения применяемого на БПЛА требуются боеприпасы с высоким могуществом, низкой себестоимостью обеспечиваемой на основании освоенных в производстве технологий, доступных среди существующих боеприпасов.

Для расширения номенклатуры боеприпасов применяемых с помощью БПЛА, а также для расширения спектра поражаемых с БПЛА целей хорошо подходят БЧ НАР малого калибра.

Широкая номенклатура разработанных в АО "Институт прикладной физики" и освоенных в производстве НАР С-8 позволяет разработать боеприпас для БПЛА без затрат на разработку БЧ.

В настоящее время на вооружении находятся ракеты С-8КОМ, С-8БМ, С-8ДМ, С-8Т, С-8ДФ, С-8-ОМ, С-8ПМ, С-8ЦМ, которые показаны на рисунке 1[1].



Рис.1 – Типы ракет С-8

Целевое назначение НАР определяется видом поражающего действия их боевых частей. Изделия калибра 80 мм комплектуются боевыми частями кумулятивно-осколочного (С-8КОМ, С-8Т), бетонобойного (С-8БМ), объемно-детонирующего (С-8ДМ, С-8ДФ), дымового действия (С-8 ЦМ), БЧ с дипольными отражателями (С-8ПМ), а также осветительными БЧ (С-8ОМ).

БЧ кумулятивного и бетонобойного действия требуют повышенной точности попадания в радиусе не более 2-3х метров. В связи с этим возникает необходимость разработки блока коррекции для этих БЧ.

Компоновка корректируемой кумулятивной БЧ С-8 КОМ, предлагаемая для использования в качестве боеприпаса для БПЛА представлена на рисунке 2.

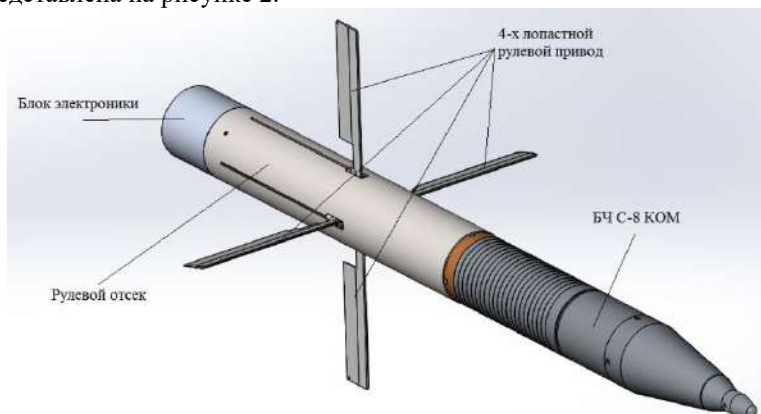


Рис.2 – Конструктивно компоновочная схема корректируемой БЧ С-8КОМ сбрасываемой с БПЛА

Конструктивно компоновочная схема сбрасываемой корректируемой боевой части С-8КОМ изображенной на рисунке 2 представляет собой БЧ С-8КОМ на которую навинчивается 4х лопастной релейный рулевой

привод с корпусом. В донной части на корпус рулевого привода устанавливается корпус блока электроники с размещенной в нем системой управления.

Для определения характеристик и параметров составных элементов конструкции позволяющих осуществлять корректировку требуется определить возмущения, получаемые сбрасываемым боеприпасом и приводящие к отклонению от точки падения.

Возмущения, получаемые сбрасываемым боеприпасом, могут вноситься колебаниями БПЛА при зависании в воздухе, системой сброса боеприпаса с БПЛА, движением воздушных масс в атмосфере. Наибольшее возмущение на сбрасываемый боеприпас оказывает перемещения воздушных масс в атмосфере, следовательно, требуется определение ветровой нагрузки.

Для определения ветровой нагрузки определим аэродинамические силы, действующие на сбрасываемую БЧ С-8 со скоростью бокового потока 10 м/с как наибольшей скорости ветра, при которой допустимы полеты наиболее распространенных типов БПЛА. Расчет аэродинамических сил проводился при помощи пакета прикладных программ Solid Works Flow simulation.

В результате расчета была определена боковая сила, действующая на БЧ С-8 в результате бокового ветра со скоростью 10 м/с. Исходя из данных полученных в результате продувки в Solid Works Flow simulation, была определена сила действующая на корпус корректируемой БЧ С-8 потоком воздуха со скоростью 10 м/с равная 3,35 Н. Масса БЧ С-8 равна 12 кг следовательно ускорение получаемое БЧ С-8 в результате воздействия ветра равняется 0,2792 м/с² Данные полученные в результате расчета силы ветра представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сила ветра и получаемые в результате его воздействия ускорения

V, м/с	F, Н	a, м/с ²	m, кг
10	3,35	0,2792	12

Траектории ветрового сноса корректируемой БЧ С-8 при условии постоянства силы воздействия и угла ветра на всем этапе полета рассчитывалось по уравнениям внешней баллистики при падении с высот 80, 180, 500 м [2]. Ветровой снос при постоянном угле ветра и потоке воздуха представлен на рисунке 3.

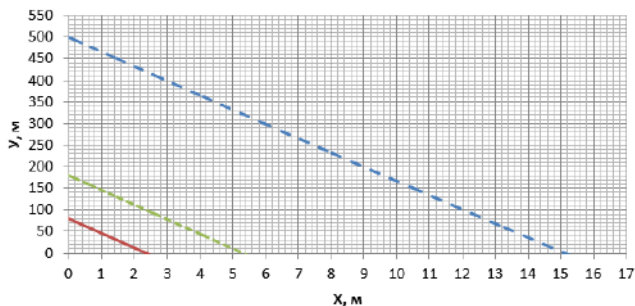


Рис.3 – Ветровой снос корректируемой БЧ С-8 потоком воздуха со скоростью 10 м/с

По данным приведенным на рисунке 4 видно, что ветровой снос для высот 80, 180, 500 м/с составляет 2.14, 5.09 и 14.80 м соответственно.

Аналогичные расчеты проведем для определения аэродинамических сил действующих на падающую БЧ в воздушном пространстве без воздействия ветра.

Расчет проводился при следующих параметрах сбрасываемой БЧ С-8: масса изделия 12 кг, длина изделия 1 м, площадь лопастей рулевого привода 0,01026 м², отклонение лопастей рулевого привода 15 градусов. Отклонение лопастей рулевого привода при релейной схеме работы рулевого привода ограничено габаритными параметрами конструкции привода. Установочные углы лопастей в данной конструкции рулевого привода равнялись 15 градусам. При этом балансировочные углы атаки изделия изменялись в зависимости от скорости полета. Зависимость балансировочных углов изделия от скорости полета приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость балансировочных углов изделия от скорости полета

V м/с	100	50	30	20	5
δ град.	15,3	17,25	19,25	18,75	19,5

Результаты расчета аэродинамических коэффициентов падающей БЧ С-8 представлены в таблице 3.

Картина распределения давлений при обтекании корректируемой БЧ С-8 потоком воздуха со скоростью 50 м/с представлена на рисунке 4.

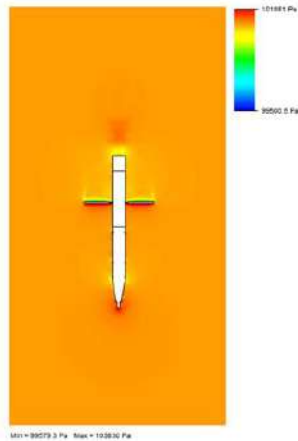


Рис.4 – Распределение давлений при обтекании корректируемой БЧ С-8КОМ потоком воздуха со скоростью 50 м/с

Таблица 3 – Аэродинамические коэффициенты в зависимости от числа маха

C_x	0,882	0,878	0,916	0,980	1,043
C_y	1,080	1,197	1,584	1,615	1,577
M	0,294	0,147	0,088	0,058	0,015

При использовании аэродинамических коэффициентов, представленных в таблице 3, по уравнениям внешней баллистики определены траектории падения корректируемой БЧ С-8 при падении без учета ветровой нагрузки [2]. Траектория падения корректируемой БЧ С-8 с высоты 500, 180, 80 метров представлена на рисунке 5

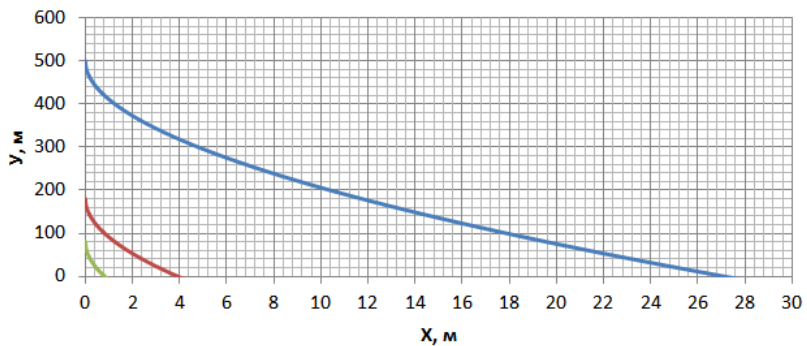


Рис.5 – Траектория падения корректируемой БЧ С-8 с разных высот

Исходя из рисунка 5 видно, что при сбросе БЧ С-8 с БПЛА с начальной скоростью равной нулю, углом отклонения пера 15 градусов с высоты 500, 180, 80 метров максимальное отклонение траектории падения БЧ равна 27, 3.9, 0.8 метров соответственно.

Проведенные исследования показали, что применение коррекции при существующих массогабаритных параметрах БЧ С-8 КОМ, при подобранных параметрах рулевого привода, а также с учетом ограничения высоты сброса более 180 метров возможно.

Литература:

1. Оружие России. М.: Изд. ООО «Военный парад», 2006г. - 1006 с.
2. Дмитриевский А. А. Внешняя баллистика. - М: "Машиностроение", 1972. - 584 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАЧАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ПУЛИ

А.А. Шептунова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, arinashseptunova@gmail.com
Научный руководитель: Гуськов А.В., д.т.н.**

Целью данной работы является исследование процесса выстрела и факторов, влияющих на начальную скорость пули.

The purpose of this work is to study the firing process and the factors influencing the initial speed of the bullet.

Выстрел из орудия – сложный термодинамический и газодинамический процесс очень быстрого превращения химической энергии пороха сначала в тепловую, а затем в кинетическую энергию пороховых газов, приводящих в движение снаряд, ствол и лафет. Во внутренней баллистике при изучении явления выстрела рассматривают четыре последовательных периода [1, с.8].

Предварительный период длится от начала горения порохового заряда до полного врезания оболочки пули в нарезы ствола. В течение этого периода в канале ствола создается давление газов, необходимое для того, чтобы сдвинуть пулю с места и преодолеть сопротивление ее оболочки врезанию в нарезы ствола. Это давление называется давлением форсирования, оно достигает 250-500 кг/см² в зависимости от геометрии нарезков, веса пули и твердости ее оболочки. Давление нарастает от 0 до

500 кг/см² [2, с.322]. Скорость нарастает от 0 до 200 м/с. Давление многократно увеличивается, в то время как увеличение скорости практически в 2 раза меньше. Горение порохового заряда в этом периоде происходит в постоянном объеме, оболочка врезается в нарезы мгновенно, а движение пули по стволу начинается сразу же при достижении в канале ствола давления форсирования. Порох в это время еще продолжает гореть.

Первый, или основной, период длится от начала движения пули до момента полного сгорания порохового заряда. В этот период сгорание пороха происходит в быстро изменяющемся объеме. В начале периода, когда скорость движения пули по каналу ствола еще не велика, количество газов растет быстрее, чем объем пространства между дном пули и дном гильзы (запультного пространства), давление газов быстро повышается и достигает наибольшей величины - 2800-3000 кг/см² (см. рис.1). Это давление называется максимальным давлением. Оно создается у стрелкового оружия при прохождении пулей 4-6 см пути [2, с.322]. Давление нарастает от 200-500 кг/см² до 2800-3000 кг/см², увеличиваясь в 6-14 раз. Скорость нарастает от 200 до 400 м/с, увеличиваясь в 2 раза. Затем, вследствие быстрого увеличения скорости движения пули, объем запультного пространства увеличивается быстрее притока новых газов, давление в стволе начинает падать и к концу периода оно достигает примерно 620-670 кг/см² (3/4 искомой начальной

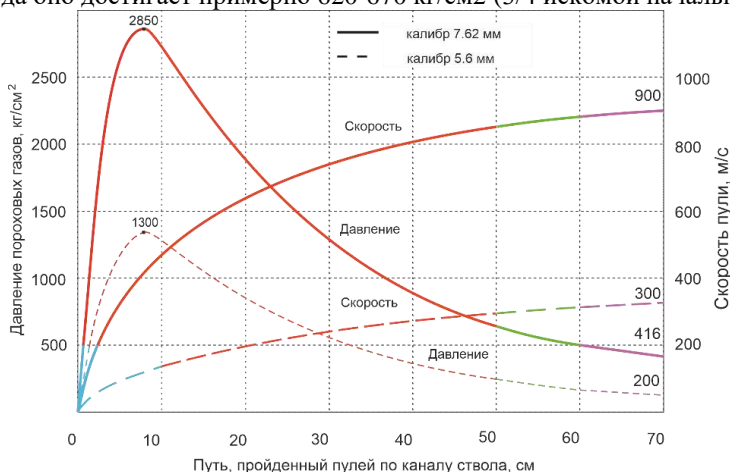


Рис.1 – Изменение давления газов и нарастание скорости пули в стволе винтовки образца 1891-1930гг и изменение давления газов и скорости пули в стволе малокалиберной винтовки.

скорости пули) при прохождении пулей 44-46 см пути, уменьшаясь в 4-5 раз. Скорость нарастает от 400 м/с до 810-825 м/с, увеличиваясь в 2 раза. За весь период скорость увеличивается приблизительно в 4 раза. Пороховой заряд сгорает незадолго до того, как пуля вылетит из канала ствола.

Синим цветом обозначен предварительный период, красным- основной период, зелёным-второй период, фиолетовым- период последействия газов.

Второй период длится от момента полного сгорания порохового заряда до момента вылета пули из канала ствола. С началом этого периода приток пороховых газов прекращается, однако сильно сжатые и нагретые газы продолжают расширяться и, продолжая оказывать давление на пулю, увеличивают скорость ее движения [2, с.323]. Давление изменяется от 620-670 кг/см² до 420-430 кг/см² при прохождении пулей 10 см пути. Скорость изменяется от 810-825 м/с до 830-835 м/с.

Третий период, или период последействия газов, длится от момента вылета пули из канала ствола до момента прекращения действия пороховых газов на пулю. В течение этого периода пороховые газы, истекающие из канала ствола со скоростью 1200-2000 м/с, продолжают действовать на пулю и сообщают ей дополнительную скорость. Наибольшей, максимальной, скорости пуля достигает в конце третьего периода на удалении нескольких десятков сантиметров от дульного среза ствола [2, с.323]. Давление стремится к атмосферному. Скорость стремится к максимуму. Этот период заканчивается в тот момент, когда давление пороховых газов на дно пули будет уравновешено сопротивлением воздуха.

Рассмотрим изменение интенсивности давления и интенсивности скорости на всех периодах выстрела.

Интенсивность давления вычисляется по формуле (1)

$$\mu = \Delta P / \Delta l \tag{1}$$

Интенсивность скорости вычисляется по формуле (2)

$$\mu = \Delta V / \Delta l \tag{2}$$

$$\mu_1(0-10\text{см}) = 2750-0/10-0 = 275$$

$$\mu_2(10-20\text{см}) = 1940-2750/20-10 = - 81$$

$$\mu_3(20-30\text{см}) = 1370-1940/30-20 = - 57$$

$$\mu_4(30-40\text{см}) = 940-1370/40-30 = - 43$$

$$\mu_5(40-50\text{см}) = 680-940/50-40 = - 26$$

$$\mu_6(50-60\text{см}) = 500-680/60-50 = - 18$$

$$\mu_7(60-70\text{см}) = 375-500/70-60 = - 12,5$$

Т.к. $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = \Delta l_4 = \Delta l_5 = \Delta l_6 = \Delta l_7$ и исходя из расчётов можно сделать вывод, что интенсивность давления резко возрастает на первых 10 см пути, а на оставшемся пути остаётся отрицательной, что означает уменьшение давления.

$$\mu_1(0-10\text{см}) = 450-0 / (10-0) * 10^2 = 4500$$

$$\mu_2(10-20\text{см}) = 625-450 / (20-10) * 10^2 = 1750$$

$$\mu_3(20-30\text{см}) = 750-625 / (30-20) * 10^2 = 1250$$

$$\mu_4(30-40\text{см}) = 800-750 / (40-30) * 10^2 = 500$$

$$\mu_5(40-50\text{см}) = 850-800 / (50-40) * 10^2 = 500$$

$$\mu_6(50-60\text{см}) = 875-850 / (60-50) * 10^2 = 250$$

$$\mu_7(60-70\text{см}) = 900-875 / (70-60) * 10^2 = 150$$

Т.к. $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = \Delta l_4 = \Delta l_5 = \Delta l_6 = \Delta l_7$ и исходя из расчётов можно сделать вывод, что интенсивность скорости уменьшается на протяжении всего пути, но при этом остаётся положительной, а значит есть прирост скорости.

На рис. 1 по винтовке калибра 7,62 мм. Если длина ствола более 60 см, то увеличение скорости незначительное.

Аналогичная картина наблюдается и у малокалиберных винтовок.

Заключение. Увеличение длины ствола незначительно влияет на увеличение начальной скорости пули. В некоторых случаях удлинённый ствол необходим для большей кучности стрельбы и для удлинения прицельной линии. Эти параметры обеспечивают повышенную точность стрельбы.

Литература:

1. *Балаганский И.А.* Основы баллистики и аэродинамики: учебное пособие – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. - 8с.
2. *Потапов А.А.* Искусство снайпера. Изд-во Фаир-Пресс, 2005. - 322-323с.
3. Внешняя баллистика: учебное пособие / *Гуськов А.В., Милевский К.Е., Сотенко А.В.* / – 2-е изд. – Новосибирск: НГТУ, 2017.

К ВОПРОСУ О ДРОНАХ-КАМИКАДЗЕ

А.А. Шептунова

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

Научный руководитель: Милевский К.Е., к.т.н., доцент

В работе выполнен сравнительный анализ дронов-камикадзе по различным характеристикам. Были изучены и сравнены такие параметры, как максимальная скорость полёта, дальность действия, масса полезной нагрузки и др.

The work performed a comparative analysis of kamikaze drones based on various characteristics. Parameters such as maximum flight speed, range, payload mass, etc. were studied and compared.

Термин «камикадзе» появился задолго до самоотверженных воинов Японии. Во время второго вторжения монголов (13 век) японцам помог тайфун, разбив войско монголов в Восточно- Китайском море. Восторженные японцы увидели, что как будто некое божество помогает им отражать атаки противника. Они назвали его «Божественный ветер» или камикадзе. «Ками» - Бог, «Кадзе» – ветер. Камикадзе стало словом нарицательным, обозначающим человека или предмет, который жертвует собой с целью уничтожения противника.

Подробнее рассмотрим малые БПЛА, в частности micro, и стратегические БПЛА, оснащенные боевой частью (барражирующие боеприпасы).

Таблица 1 – Цели.

Дроны	Цель
IAI Harop	ПВО (в основном РЛС)
IAI Harop	Наземные цели, ПВО
Switchblade 600	Бронетехника
Kargu-2	Живая сила, бронетехника (в основном закрытые позиции)
CH-901	Бронетехника
Куб-БЛА	Наземные цели, наземная техника, живая сила
Ланцет-3	Наземные цели, наземная техника, живая сила
Shahed-136	Наземные цели
Упырь	Живая сила, бронетехника (в основном закрытые позиции)

На основании таблицы 1 можно сделать выводы, что дроны «IAI Harop» и «IAI Harop» используются для нейтрализации вражеских РЛС и противовоздушной обороны. «Switchblade 600» и «CH-901» используются для нанесения ударов по вражеским танкам и другим

бронированным целям. «Куб-БЛА», «Ланцет-3» используются для атаки на пехоту, легкобронированные и бронированные цели, строения и другие наземные объекты. «IAI Harop» и «Shahed-136» используются для атаки на строения и другие наземные объекты. «Упырь» и «Kargu-2» являются универсальными дронами, которые могут быть использованы как для атаки на живую силу, так и на бронетехнику. Используются для различных задач, включая атаку на закрытые позиции противника.

Таблица 2 – Способы уничтожения дронов.

Дроны	Способ уничтожения дрона
IAI Harop	ЗРПК «Панцирь» комплексы ТОР-2КМ
IAI Harop	РЭБ, комплексы ТОР-2КМ, ЗРПК «Панцирь»
Switchblade 600	РЭБ, комплексы ТОР-2КМ, ЗРПК «Панцирь», ПВО
Kargu-2	-
СН-901	комплексы ТОР-2КМ, ЗРПК «Панцирь», РЭБ, лазерные установки
Куб-БЛА	ПВО, комплексы ТОР-2КМ, ЗРПК «Панцирь»
Ланцет-3	ПВО, комплексы ТОР-2КМ, ЗРПК «Панцирь»
Shahed-136	ПВО и стрелковое оружие
Упырь	-

Основываясь на данных из таблицы 2 можно сказать, что все дроны уничтожаются практически одним и тем же способом. Только «Упырь» и «Kargu-2» сложно уничтожить, благодаря их высокой манёвренности.

Таблица 3. Сравнение лётно-технических характеристик.

Дроны	Размах крыла, м	Длина, м	Масса боевой части, кг	Скорость (max), км/ч	Продолжительность полёта, ч	Дальность действия, км
IAI Harop	2,1	2,7	32	185	3	400
IAI Harop	3	2,5	23	185	6	1000
Switchblade 600	3,9	1,3	8,4	185	2/3	40
Kargu-2	0,6	0,6	1,9	72	1/2	5
СН-901	1,5	1,2	*	150	2	15
Куб-БЛА	1,2	0,95	3	130	1/2	*
Ланцет-3	1	1,65	5	110	1	40
Shahed-136	2,5	3,5	40	185	12	2500
Упырь	0,45	0,1	7	25	2	7,5

Исходя из данных таблицы 3, построим диаграммы.

Диаграмма 1. Максимальная скорость полёта.



Диаграмма 2. Продолжительность полёта.

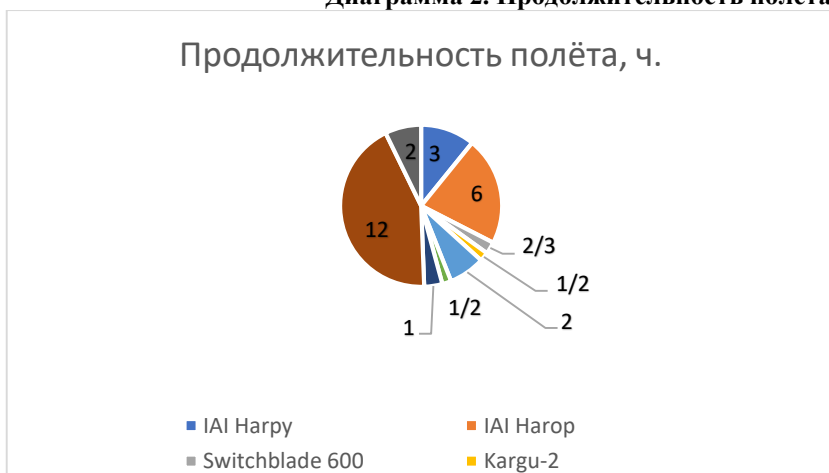
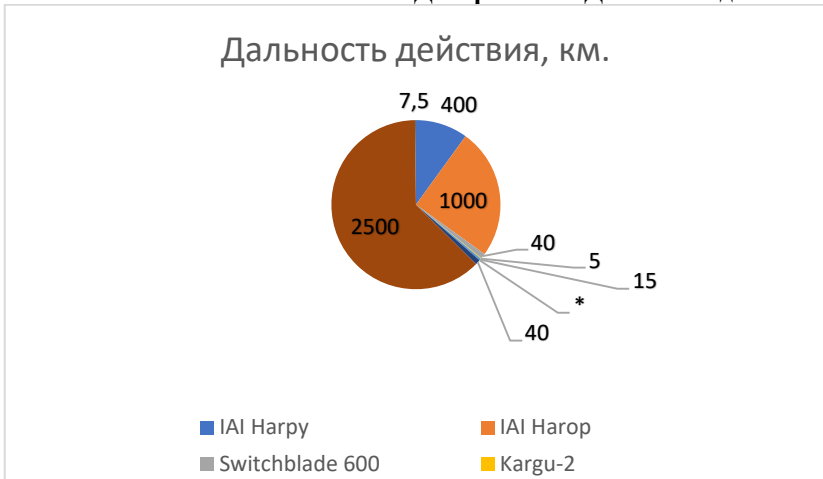


Диаграмма 3. Дальность действия.



В результате сравнительного анализа дронов-камикадзе было выявлено, что различные модели этих устройств обладают разными характеристиками и предназначены для разных целей. Некоторые дроны-камикадзе имеют высокую максимальную скорость полета, что позволяет им быстро достигать своей цели и наносить удар. Другие модели обладают большой дальностью действия, что позволяет им проникать на большие расстояния и атаковать цели в отдаленных местах. Масса боевой части также различается у разных моделей дронов-камикадзе, что определяет их способность нести определенные виды оружия или другие нагрузки.

При выборе дрона-камикадзе необходимо учитывать его максимальную скорость полета, дальность действия, массу полезной нагрузки, продолжительность полёта, чтобы обеспечить эффективность выполнения поставленных задач и минимизировать возможные недостатки.

Литература:

1. Чулууны Далай. Монголия в XIII-XIV веках. М., 1983. – 73-80с.
2. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 80-82с.
3. ГБУ «АПП». Дроны и беспилотные летательные аппараты. – 2021. – 4с.

4. Суомалайнен А.П. Беспилотники: автомобили, дроны, мультикоптеры. – Москва: ДМК Пресс, 2018 г. – 35-38с.
5. Широкопад А.Б. Дроны. Оружие XXI века. – Москва: ВЕЧЕ, 2023. – 317-324с.
6. Щербаков И.В. Барражирующие боеприпасы: оружие нового века. – 2022. – 13-24с.
7. Интернет-ресурс международной организации UVS International. – URL: <http://uvs-international.org> .
8. *Настоящее время*. Интервью главы ГУР Минобороны Украины Кирилла Буданова [Электронный ресурс] – 2023. (Запрещён на территории РФ с 27 февраля 2022г.) – URL: https://www.youtube.com/watch?v=ZeSRtX7oL_E .
9. *FREEДОМ*. Интервью Грабского. Ядерные испытания РФ. Иранские дроны – оружие террора [Электронный ресурс] – 2022. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=S7hXd2c39iY&t=8s> .

ОБРАЗОВАНИЕ СТРУЙ В ЗАЗОРАХ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

В.П. Халеменчук, К.А. Тен
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск, slava.khalemenchuk@mail.ru

Исследовался выброс потока частиц разных размеров (ударно-волновое «пыление») из конструкционных стыков металлических пластин при сильном ударном воздействии от заряда ВВ. Регистрация процесса выброса микрочастиц производилась методом импульсной рентгенографии синхротронного излучения. Приведены распределения плотности вдоль образующихся потоков микрочастиц.

The emission of a stream of particles of different sizes (shock wave “dusting”) from structural joints of metal plates under strong impact from an explosive charge was studied. The process of ejection of microparticles was recorded using the method of pulsed x-ray diffraction of synchrotron radiation. The density distributions along the resulting flows of microparticles are given.

При взаимодействии сильной ударной волны с металлами со свободной поверхности происходит выброс потока микрочастиц. Это явление получило название «пыление» металлов. Размеры и количество частиц, а как следствие и их скорость, и масса зависит от формы нагружающего импульса, чистоты обработки поверхности и структуры материала [1-5]. В современных устройствах данный эффект негативно

влияет на получение максимальных параметров в кумулятивных процессах.

В данной работе рассматривается случай образования струи из стыка двух металлических пластин в двух вариантах: простой стык и ступенчатый стык. Сравниваются потоки микрочастиц при ударно-волновом нагружении из двух сборок.

Регистрация выброса микрочастиц проводилась методом импульсной рентгенографии на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3 и ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН В. Регистрация рентгеновской тени осуществлялась детектором DIMEX.

Исследовался процесс выброса частиц со свободной поверхности с заданной геометрией под действием ударной волны (УВ) интенсивностью ~ 40 ГПа. Выброс вещества формировался из зазоров в нагружаемом образце из меди и олова.

В докладе представлены экспериментальные результаты по регистрации линейной плотности от 5 мг/см² и скорости потока 1-3 км/с частиц из исследованных пластин.

Показана эффективность использования методики для исследования процессов пыления из конструкционных стыков. Результаты работы важны для анализа корректности работы устройств ударного нагружения.

Литература

1. L. Signor, E. Lescoutel, D. Loison, T. De Rességuier, A. Dragon¹, and G. Roy. Experimental study of dynamic fragmentation of shockloaded metals below and above melting. EPJ Web of Conferences. – 2010. – V. 6, N. 39012.
2. Thibaut De Resseguier, Didier Loison, Emilien Lescoute, Loic Signor, Andre Dragon. Dynamic fragmentation of laser shock-melted metals: some experimental advances. Journal of theoretical and applied mechanics. – 2010. 48, 4. – PP. 957-972.
3. M.V. Zellner, M. Byers, G. Dimonte J.E. Hammerberg, T.E. Germann, P.A. Rigg, W.T. Buttler. Influence of shockwave profile on ejection of micron-scale material from shocked Sn surfaces: An experimental study. EPJ Web of Conferences. – 2010. – V. 6, N 39012.
4. Антипов М.В., Георгиевская А. Б., Игонин В.В., Лебедева М.О., Панов К.Н., Утенков А.А., Садунов В.Д., Юртов И.В. Результаты исследований процесса выброса частиц со свободной поверхности металлов под действием ударной волны // Extreme states of substance. Detonation. Shock waves. Proceedings International conference XVII Khariton's topical scientific readings, March 23 – 27, 2015. RFNC-VNIIEF, Sarov.

5. А.Л. Михайлов, В. Л. Огородников, В. С. Сасик, А. И. Лебедев, Д. Е. Зотов, С. В. Ерунов, М. А. Сырунин, В. Д. Садунов, Н. В. Невмержицкий, С. А. Лобастов, В. В. Бурцев, Е. В. Кулаков, О. А. Клешевников, М. В. Анпшпов, И. В. Юртов, А. А. Утенков, Е. Д. Сеньковский, С. А. Абакумов, В. В. Глушихин, Д. В. Пресняков, И. А. Калашник, К.Н. Панов, В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко, В. Н. Филяев, А. В. Мишанов. Экспериментальное исследование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности. // XV Международная конференция Харитоновские научно-тематические чтения «Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны», г. Саров, 18-22 марта 2013 г. С. 279.

ИЗУЧЕНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВАТОГО ВЕЩЕСТВА

Юношев А.С.¹, Пластинин А.В.¹, Плуман А.А.^{1,2}, Девушкин М.П.^{1,2}

¹Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

**²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Pluman@bk.ru**

Работа посвящена изучению ударно-волновому инициированию взрывчатых веществ (ВВ). Исследование ударно-волнового инициирования важно по таким причинам как: определение условий безопасного обращения с ВВ; Оптимизация способов возбуждения детонации. Основным классом промышленных веществ является эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ). Для исследования использовались сборки, где металась дюралюминиевая пластина скользящей детонацией, в другую дюралюминиевую пластину с пассивным зарядом. Дюралюминиевые пластины находились под углом друг к другу, для того, чтобы скорость контакта пластин превышала скорость детонации ЭмВВ. В сборках варьировались такие параметры как, толщина активного заряда ЭмВВ, толщина дюралюминиевой пластины, плотности активного и пассивного заряда ЭмВВ. Процесс регистрировался с помощью импульсной рентгенографии.

The work is devoted to the study of shock wave initiation of explosives. The study of shock wave initiation is important for such reasons as: determining the conditions for safe handling of explosives; Optimizing the methods of detonation initiation. The main class of industrial substances is emulsion explosives (Emv). For the study, assemblies were used where a sliding detonation duralumin plate was thrown into another duralumin plate with a passive charge. The duralumin plates were positioned at an angle to each other so that the contact speed of the plates exceeded the detonation speed of the EmVV. In the assemblies, such parameters as the thickness of the active charge Ev, the thickness of the duralumin plate, the densities of the active and passive charge EmVV varied. The process was recorded using pulsed radiography.

Цель работы заключается в выявление характеристик начального импульса (НИ) при ударно-волновом инициировании ЭМВВ: давление, при котором происходит инициирование, зависимость глубины инициирования от давления НИ. В основе исследуемого ЭМВВ лежит эмульсионная матрица, в составе которой присутствуют раствор аммиачной (68.25%) и натриевой (10.55%) селитры в воде (15.2%), промышленное масло И-20 (4%) и эмульгатор сорбитан моноолеат (2%). Плотность эмульсии составляет 1.41 г/см^3 . В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25. Исследовались ЭМВВ с плотностями $0,5 \text{ г/см}^3$ и $1,0 \text{ г/см}^3$. Использовались дюралюминиевые пластины толщнами 1,5 и 3,0 мм. Скорости метания пластин варьировались от 350 до 1450 м/с у пластин толщиной 1,5 мм и от 350 до 1000 м/с у пластин толщиной 3 мм. Процесс удара регистрировался импульсной рентгенографией. На рентгенограмме фиксировались формы ударной и детонационной (в случае инициирования детонации) волн. По рентгенограмме были рассчитана скорости детонационных волн, массовые скорости пластин, построены ударные адиабаты исследуемых ЭМВВ. На рентгенограммах были измерены глубины инициирования, в случае инициирования детонации.

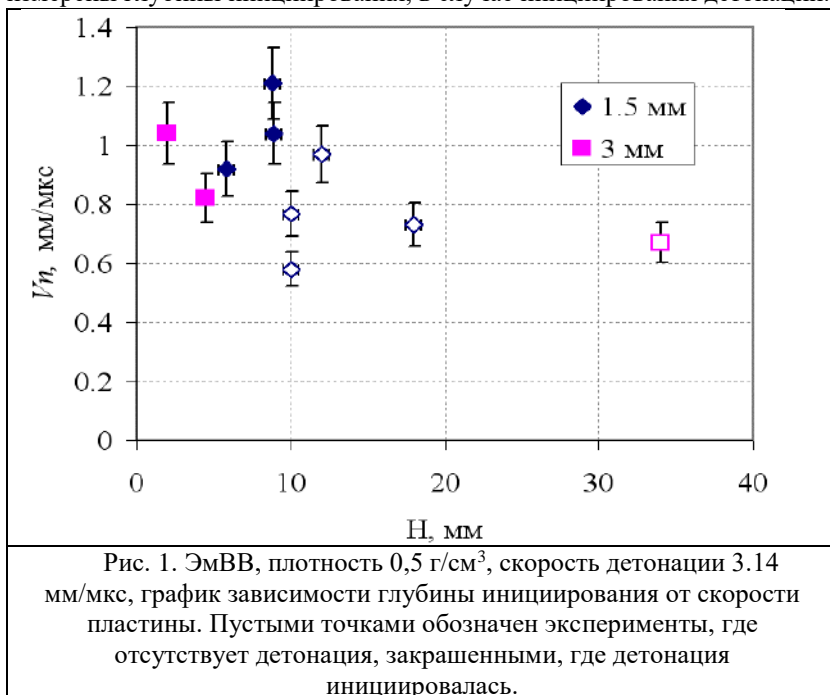
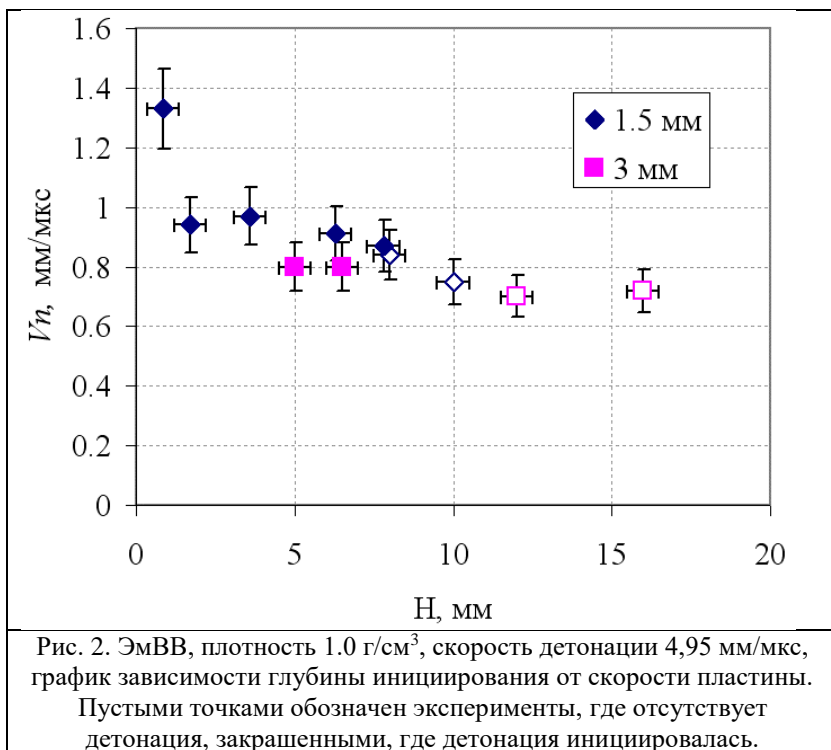


Рис. 1. ЭМВВ, плотность $0,5 \text{ г/см}^3$, скорость детонации 3.14 мм/мкс, график зависимости глубины инициирования от скорости пластины. Пустыми точками обозначены эксперименты, где отсутствует детонация, закрашенными, где детонация инициировалась.



Научных работ, посвященных ударному или ударно-волновому инициированию этого класса взрывчатых веществ крайне мало. Например, в [1, 2] изучается ударно-волновое инициирование различных ЭМВВ с начальной плотностью 1.248 г/см³ и 1.18-1.33 г/см³, соответственно, созданного на основе аммиачной селитры. В [3] анализируется процесс возбуждения детонации в различных составах ЭМВВ при простреле их высокоскоростными компактными ударниками.

В результате проведения исследования, были получены зависимости глубины инициирования ЭМВВ от скорости метаемой пластины, рассчитано давление в исследуемом ЭМВВ в момент удара, приводящее к инициированию детонации.

Литература

1. J. Lee, F. W. Sandstrom, B. G. Craig, and P. -A. Fersson
DETONATION AND SHOCK INITIATION PROPERTIES OF EMULSION
EXPLOSIVES// in: *Proc. of the 9th Int. Symp. on Detonation* (1989), pp. 573–
584.
2. Сильвестров В.В., Караханов С.М., Дерибас А.А., Пластинин А.В.
Ударно-волновая чувствительность эмульсионного ВВ // Труды межд.
конференции «IX Харитоновские тематические чтения», 12–16 марта
2007 г., Саров., С.133-138.
3. K.L.C. Nielsen, C. Craciun, T.R. Craig, R. Turcotte High-velocity
projectile initiation of emulsion explosives //
[https://www.researchgate.net/publication/257432578_High-
velocity_Projectile_Initiation_of_Emulsion_Explosives](https://www.researchgate.net/publication/257432578_High-velocity_Projectile_Initiation_of_Emulsion_Explosives)

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА КОНТРБАТАРЕЙНОЙ БОРЬБЫ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ НАРВ С-8

В.В. Романов², Р.В. Демин², Е.Я. Брагунцов^{1,2}, С.С.Назаров^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Институт прикладной физики

г. Новосибирск, nazarov.s.2000@mail.ru

В данной статье представлены результаты разработки комплекса контрбатареистой борьбы (КББ) предназначенного для действий на дальностях до 15 км, сформированного путем объединения РЛС и РСЗО на базе модернизированных НАР С-8. Проведена расчетная оценка дальности и эффективности действия предлагаемого комплекса КББ.

This article presents the results of the development of a counter battery warfare (CBW) complex, designed for operations at ranges to 15km, formed by combining radio location system and multiple launch rocket systems based on modernized unguided aircraft missiles S-8. A calculated assessment of the range and effectiveness of the proposed complex CBW was carried out.

Введение

Современные вооруженные конфликты показывают серьезную необходимость эффективной борьбы с артиллерийскими силами противника, которые включают артиллерийские орудия, минометы, РСЗО, БПЛА и их расчеты.

Решение этой непростой задачи осуществляется в рамках ведения контрбатарейной борьбы (КББ). КББ сфокусирована на обнаружение, уничтожение или подавление (цель считается подавленной, если огневые средства противника и их боевые расчеты потеряли способность продолжать артиллерийскую стрельбу в течение какого-то периода времени) артиллерийских сил противника [1-4]. Основными компонентами системы КББ являются средства разведки и огневые средства подавления артиллерийских сил противника.

1. Причины необходимости совершенствования комплексов КББ

Применение неуправляемых огневых средства подавления, за исключением РСЗО, не даёт преимущества в КББ, поскольку они обладают низкой скорострельностью, что для нивелирования ошибок при стрельбе ведет к большим потерям по расходу боеприпасов.

Применение управляемых (корректируемых) снарядов ставит ряд вопросов, первый из которых – высокая стоимость, второй – необходимость вести его обязательную корректировку, а это наличие корректировщика, постоянно наблюдающего цель, и третий – отсутствие большого количества данных изделий.

РСЗО обладают рядом неоспоримых достоинств, которые обеспечивают постоянное возрастание их роли в огневом поражении противника. Основными из них являются высокая плотность огня на поражение, высокая подвижность и транспортабельность, независимость боевого применения от погодных и географических условий, простота конструкции, эксплуатации, боевого применения.

Также можно отметить, что для проведения КББ используются дорогие ракеты большого калибра с большой полезной нагрузкой, но опыт СВО показывает, что КББ сводится к уничтожению малоразмерных, слабозащищенных целей, таких как, например, РЛС, артиллерийские и минометные расчеты и др.

Перечисленные недостатки являются причиной необходимости совершенствования комплексов КББ.

Анализа недостатков систем, применяемых в ходе КББ, показывает необходимость замены дорогих ракет большого калибра с избыточной полезной нагрузкой на более дешевые, но достаточные для обеспечения эффективности КББ. Для КББ на больших дальностях нерешённая проблема замены дорогих ракет большого калибра с избыточной полезной нагрузкой на сегодняшний день оправдывается необходимостью обеспечения дальности, которая требует применения двигательных устройств большого калибра. Наиболее остро нуждаются в совершенствовании средства поражения, применяемые при ведении КББ на дистанциях до 15 км, обладающие следующими недостатками:

- низкая скорострельность;
- невысокая мобильность;
- невозможность скрытной работы;
- высокая стоимость.

Поскольку применение РСЗО в КББ обладает рядом неоспоримых достоинств, которые обеспечивают постоянное возрастание их роли в огневом поражении противника, то их применение при ведении КББ на дистанциях до 15 км также целесообразно. Однако применение залпа ракет РСЗО БМ-21 Град с существующим рассеянием ракет затратное. В связи с перечисленными достоинствами РСЗО с целью удешевления и повышения эффективности средств поражения РСЗО применяемых при ведении КББ на дистанциях до 15 км целесообразно дополнительно разработать РСЗО меньше калибра. На сегодняшний день на вооружении Российской Армии таких РСЗО нет. Однако попытки их разработки неоднократно проводились [5,6].

2. Формирование облика нового комплекса КББ с дальностью действия до 15 км

Целью данной работы является разработка комплекса контрбатарейной борьбы, объединив РЛС и РСЗО на базе НАР С-8 (калибром 80 мм с осколочно-фугасной боевой частью), предназначенного для ведения КББ на дистанциях до 15 км с расчетной оценкой дальности и эффективности его действия.

Огневые средства предлагаемого комплекса для КББ являются НАР С-8 снаряжаемые в многоствольный пусковой блок (ПБ) размещенный на пусковой платформе, установленной на гусеничном или колесном шасси.

Структурная схема комплекса представлена на рис. 1.



Рис. 1 – Структурная схема комплекса КББ.

Основным компонентом предлагаемого комплекса КББ является осколочно-фугасная ракета с С-8 с необходимыми характеристиками. Осколочно-фугасная ракета системы НАРВ С-8 с существующими характеристиками [7] непригодна в качестве боеприпаса комплекса КББ с дальностью действия 15 км. Необходимо провести модернизацию ракеты как в части совершенствования двигательной установки обеспечивающей дальности пуска до 15 км, так и боевой части, обеспечивающей эффективность КББ на дальностях до 15 км.

3. Проектирование ракеты

Что касается модернизации боевой части ракеты, то она в данной работе произведена путем замены осколочной оболочки с заданным дроблением на боевую часть с готовыми поражающими элементами (ГПЭ). Кроме того увеличено количество осколков.

Наилучшей аэродинамической формой ГПЭ с круговым осколочным полем обладают осколки-шарики. Минимальной массой для поражения живой силы в бронезилетах по типу «С» обладают шарики диаметром 4мм массой 0,263г. Спроектированная БЧ состоит из корпуса с брикетами ГПЭ, переходной втулки под взрыватель, контактного взрывателя У-404, ВВ (А-IX-II) и технологической заглушки. Брикеты состоят из наполнителя и шариков. Масса БЧ составила 10.5 кг, длина 791 мм.

Конструктивно-компоновочная схема модернизированной БЧ приведена на рис.2.

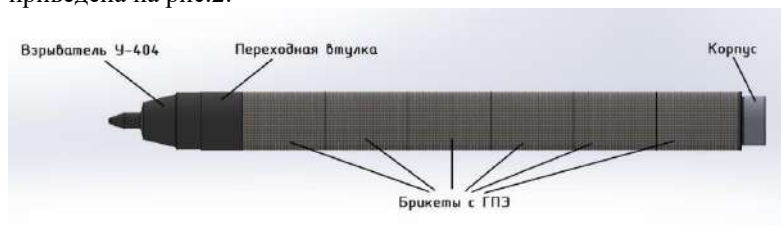


Рис. 2 – Конструктивно-компоновочная схема БЧ

Совершенствование двигательной установки обеспечивающей дальности пуска осуществлено за счет применения двух РДТТ, а именно, стартового и маршевого. Оценка дальности полета ракет с применением двух РДТТ проводилась при решении системы уравнений движения ЛА в вертикальной плоскости [8]. На рис. 5 представлена траектория движения НАР С-8 с двухрежимным двигателем при пуске с земли под углом 55°.

Из представленных графиков траектории полета (см. рис. 3) видно, что дальность применения модернизированных ракет с двухрежимным двигателем достигает 15 км, что соответствует поставленным требованиям.

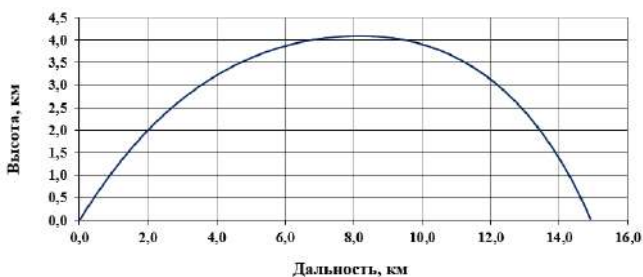


Рис. 3— Траектория движения НАР С-8 с двухрежимным двигателем Конструктивно-компоновочная схема ракеты для КББ представлена на рис.4.



Рис. 4 - Конструктивно-компоновочная схема ракеты для КББ.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости вероятности поражения живой силы «стоя» в бронезилете по типу «С» от дальности стрельбы и количества НАР С-8 в залпе. Расчет проводился по методике изложенной в работе [9].

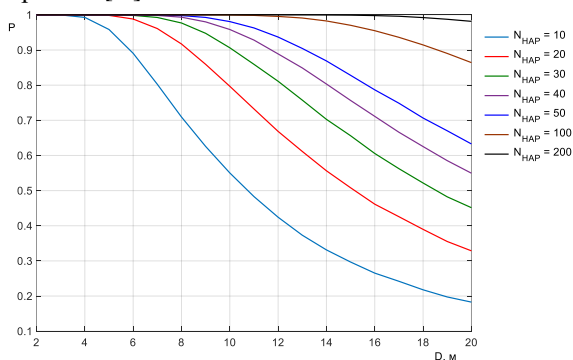


Рис. 4— Зависимости вероятности поражения живой силы «стоя» в бронезилете по типу «С» от дальности стрельбы и количества модернизированных НАР С-8 в залпе.

Согласно данным приведенным на рис. 4 для обеспечения вероятности поражения не менее 0,5 на дальности 11 км требуется залп

модернизированных НАР С-8 в количестве не менее 10 шт., а на дальности 15 км – не менее 20 шт. Такие показатели приемлемы для КББ.

Заключение

Предлагаемый комплекс КББ, сформированный путем использования РЛС и РСЗО на базе модернизированных неуправляемых авиационных ракет калибром 80 мм с модернизированной осколочно-фугасной боевой частью и новым двигательным устройством имеет следующие преимущества:

- Независимость от наличия и возможностей союзных артиллерийских и минометных расчетов в данном квадрате при ведении КББ. Экономия времени на поражение или подавление противника.
- Двойное назначение. Обеспечивает не только возможность КББ в качестве РСЗО, но и возможность повысить эффективность работы подразделений по основным боевым задачам;
- Обеспечение высокой плотности огня;
- Низкая стоимость залпа по сравнению со стоимостью ракет, применяемых в штатных системах КББ на дальностях до 15 км.

Литература:

1. Малаховский Е.К., Матвеев А.И. Стрельба на поражение батарей. М., Воениздат, 1971. 236 с. с ил.;
 2. https://nvo.ng.ru/armament/2022-03-10/1_1180_artillery.html.
- Пушки против пушек;
3. О'Мэлли Т. Дж. Современная артиллерия: орудия, РСЗО, минометы. – М.: Изд-во ЭКСМО-Пресс, 2000.– 160 с., ил.;
 4. Шунков, Виктор Николаевич. Полная энциклопедия современного вооружения России/ В.Н. Шунков. – Москва : Издательство АСТ, 2017. – 240 с.: ил. – (Военная энциклопедия);
 5. <https://selhoztehnika.com/voennyj-vezdehod-mtlb-motolyga-ustrojstvo-tehnicheskie-harakteristiki>. Военный вездеход МТЛБ «мотолыга»: устройство, технические характеристики;
 6. Патент RU 98559 U1, МПК F41F 3/04 (2006.01) Российская Федерация. Мобильная ракетная установка «мини-град» / Булыгин Андрей Николаевич, Манько Владимир Пантелеймонович, Москалев Александр Анатольевич - № 2010121675/11, заявл. 27.05.2010; опубл. 20.10.2010 Бюл. № 29;
 7. Оружие России. М.: Изд. ООО «Военный парад», 2006г.-1014 с.
 8. Дмитриевский А. А. Внешняя баллистика. - М: "Машиностроение", 1972. - 584 с.
 9. Действие средств поражения и боеприпасов: учебн. пособие/ И.А. Балаганский, Л.А. Мержиевский. -2-е изд.-Новосибирск: Изд-во НГТУ,2012. -408 с.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АВИАРАКЕТОСТРОЕНИЯ

Секция ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Афанасенков А.А.	Новосибирск	3
Лушов А.А.	Новосибирск	6
Морозов В.М., Мороз Ф.А.	Новосибирск	8
Харюшина М.М.	Новосибирск	13
Черепанов А.Д.	Новосибирск	16
Шихова М.А.	Новосибирск	20

Секция ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН

Гульков Т.В.	Новосибирск	23
Душухин Д.О.	Новосибирск	27
Ключникова Е.Ю.	Новосибирск	29
Ковальчук Л.М., Бурнышева Т.В.	Новосибирск	34
Косачева В.С.	Новосибирск	38
Нгуен К.М., Шелевая Д.Р.	Новосибирск	41
Николаева Е.Д.	Новосибирск	50
Поддубная К.В.	Новосибирск	53
Решетников Д.Е.	Новосибирск	57
Ле В.Т.	Новосибирск	61
Уткина В.С.	Новосибирск	64
Шелевая Д.Р., Нгуен К.М.	Новосибирск	67
Штрайх А.Е., Кожевников А.Н.	Новосибирск	77

**Секция ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛА**

Беляева Е.В., Хромова И.В.	Новосибирск	80
Брызгалов К.В.	Новосибирск	84
Григорьевская В.М., Хромова И.В.	Новосибирск	88
Сюзаев А.И., Гусаченко Д.В.,	Новосибирск	92
Горбачев М.В.		
Чемичев Д.Г., Швецов Д.А.,	Новосибирск	94
Жуков В.И.		
Чушкина Е.П., Хромова И.В.	Новосибирск	99
Шабалов С.Д.	Новосибирск	102
Шабалов С.Д.	Новосибирск	108
Ян Лун Н.	Новосибирск	110

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

Абдразаков А.К., Гуськов А.В.	Новосибирск	115
Абдразаков А.К., Гуськов А.В.	Новосибирск	119
Белоусова Н.С.	Новосибирск	124
Романов В.В., Демин Р.В.,	Новосибирск	127
Брагунцов Е.Я., Назаров С.С.		
Гуськов А.В., Бойченко В.Н.,	Новосибирск	134
Хребтова М.С.		
Романов В.В., Демин Р.В.,	Новосибирск	138
Брагунцов Е.Я., Мурзаева А.Б.		
Романов В.В., Демин Р.В.,	Новосибирск	141
Брагунцов Е.Я., Бессонов В.Е.,		
Назаров С.С., Цыбрий А.И.		
Девушкин М.П., Плуман А.А.,	Новосибирск	145
Юношев А.С.		
Зубашевский К.М.	Новосибирск	147
Игноватова А.О., Гречухина М.С.,	Самара	150
Воронцова В.А.		

Гуськов А.В., Хребтова М.С., Останина К.А.	Новосибирск	153
Потанина Е.Ю.	Новосибирск	159
Гилев С.Д., Петров Л.Е.	Новосибирск	163
Романов В.В., Дёмин Р.В., Брагунов Е.Я., Цыбрий А.И.	Новосибирск	164
Шептунова А.А.	Новосибирск	169
Шептунова А.А.	Новосибирск	173
В.П. Халеменчук, К.А. Тен	Новосибирск	177
Юношев А.С., Пластинин А.В., Плуман А.А., Девушкин М.П.	Новосибирск	179
Романов В.В., Демин Р.В., Брагунов Е.Я., Назаров С.С.	Новосибирск	182

НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ

**XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых
г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.**

Сборник научных трудов в 11 частях

Часть 10

Под редакцией Соколовой Д.О.

Подписано в печать 29.01.2024. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 11,16. Печ. л. 12,0. Тираж 100 экз. Заказ № Р-02877

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20