



# **ЗАСЕДАНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ СЕКЦИЙ НАУЧНОЙ СЕССИИ НИЯУ МИФИ – 2024**

**ПО НАПРАВЛЕНИЮ  
ИННОВАЦИОННЫЕ ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**посвященные 90-летию  
со дня рождения В.Ф. Куропатенко**

**Сборник научных трудов  
всероссийской конференции**

**СФТИ НИЯУ МИФИ  
31 января - 02 февраля 2024 г.**

УДК 621.039 + 658.51 + 681.5  
НЗ4

НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2024 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 31 января – 2 февраля 2024 г. - М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2024. – 268 с.

Настоящая книга является сборником научных трудов, представленных в рамках всероссийской научно-практической конференции по направлению «Инновационные ядерные технологии» ежегодных заседаний Научной сессии Национального исследовательского ядерного университета МИФИ на базе Снежинского физико-технического института НИЯУ МИФИ. Работа конференции проходит по секциям: «Технологии и материалы в наукоемком производстве», «Моделирование физических и технологических процессов», «Физико-математические и информационные проблемы инновационных технологий», «Современные технологии программно-аппаратных средств», «Образовательные технологии в интересах развития атомной отрасли».

Заседания по данному направлению проводятся в СФТИ НИЯУ МИФИ совместно с градообразующим предприятием Снежинска ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина» с 2011 года.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:

Линник О.В.

- руководитель СФТИ НИЯУ МИФИ, к.и.н., доцент

СОПРЕДСЕДАТЕЛЬ:

Симоненко В.А.

- зам. научного руководителя ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», д.ф-м.н., профессор

ISBN 978-5-7262-3041-2

© Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, 2024



**Секция 1.****ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ  
В НАУКОЕМКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА ПРОЦЕСС СКАНИРОВАНИЯ Бологов А.В., Голунов А.А., Горбатов А.Д.	10
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕПАРАТОВ СЕРИИ «ВЫБОР» ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА Габбасова Н.Р., Кузнецова Н.А., Сахненко О.А.	13
ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИЛИНДРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Ежов Р.А., Мирошкин З.К., Орлова Н.Ю., Пильщиков А.А., Кирсанов В.А.	16
ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА Задворнова О.В., Орлова Н.Ю.	18
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКОВ ПОСЛЕ 3D-ПЕЧАТИ Казаков И.А., Гнеушев Н.В., Горбатов А.Д.	22
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРОНШТЕЙНА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Казаков И.А., Каримов Р.А., Кирсанов В.А., Орлова Н.Ю.	24
ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПЛУТОНИЯ В МОКС-ТОПЛИВЕ ПО ШЛИФУ ТАБЛЕТКИ Карзанов Ю.А., Мальцев А.А.	26
ЦИФРОВИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ Каримов Р.А., Каримов В.А.	27
РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ УДАРЕ Степанов И.Ю., Коробейников К.А.	
СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКА Nd:Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГОМОГЕННОГО СООСАЖДЕНИЯ Колесова Т.В., Титова О.В., Юрченко О.С., Василенко Н.В., Сериков А.С., Лысенко О.В.	29
ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ КАПРОЛОНА Кушнир П.О., Шульгин А.Н., Кушнир О.С.	32

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ТУРБОКОМПРЕССОРА МЕТОДОМ РЕВЕРСИВНОГО ИНЖИНИРИНГА Мирошкин З.К., Ежов Р.А., Орлова Н.Ю., Пильщиков А.А., Гусев А.И.	38
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ SLM НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА Пильщиков А.А., Орлова Н.Ю., Ежов Р.А., Мирошкин З.К.	41
ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СПАЙКИ ФИЛАМЕНТА Саманова А.И., Тельгереева С.А.	46
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ Сериков А.С., Лысенко О.В., Горбоконица О.И.	48
ПОДБОР ЖАРОСТОЙКОГО СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛИВНОЙ ФИЛЬЕРЫ МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ДИЗАЙНАФГУП «ПО «МАЯК» Стаканова Н.А., Пичугина Л.О., Карзанов Ю.А., Поляков Е.В.	51
ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ПРОДУКЦИИ ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ Ушков А.В., Шарапов И.К.	52
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ Фазлитдинова А.Г., Тюменцев В.А.	56
НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СВАРКЕ АЛЮМИНИЯ С ПОЛНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ Филимоненко А.Г., Гареев И.С., Собко С.А. Белоусов С.В., Иванов М.В.	59
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СМЕСЕЙ ТЭНА С НАНОДИСПЕРСНЫМ АЛЮМИНИЕМ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ЛАЗЕРНМУ ИМПУЛЬСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ Шишкин Н.Я., Глущенко А.Г., Суров М.С., Бакиров А.Р., Сдобнов В.И., Станкевич А.В., Грибанов Д.А., Долгих С.М.	61
ДОРАБОТКА ДВИГАТЕЛЯ ТЯЖЁЛОГО МОТОЦИКЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СМЕЩЕНИЯ ПИКА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В СТОРОНУ БОЛЕЕ ВЫСОКИХ ОБОРОТОВ Шишкин Н.Я., Паршукова Н.Ю.	65

**Секция 2.****МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В СОСТАВЕ ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ВОЛНА» Абраменко И.А., Анучин М.Г., Кузнецов А.Н., Новаковский Н.С.	68
МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ В ЭКСТРАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ Алтынникова У.Ф., Мастюк Д.А., Ганеева Д.Ф.	71
РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКСИАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР В ТВЭЛ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ Бабак Д.В., Ефимов-Сойни Н.К.	74
АЛГОРИТМ ДВУМЕРНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ В ФОРМАЛИЗМЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ Балашов Н.М., Майер А.Е.	79
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТАНТНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УРАНА-238 НА ОСНОВНЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 Баранчикова А.О., Исанов К.А., Мантуров Г.Н.	82
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КУРОПАТЕНКО Беляев П. Е., Макеева И.Р., Мастюк Д.А., Пигасов Е.Е., Куприянец Т.А.	84
РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КАССЕТ С ОЯТ ИЗ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС Блинов А.С., Доценко В.В., Жабунина О.Ю., Лушина Ю.Ю., Никульшин М.В., Титов В.В., Товмасын Е.А.	87
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В РАМКАХ ПРОСТЫХ МОДЕЛЕЙ Боярских К.А., Хищенко К.В.	90
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПРОТЕКАНИИ ТОКА ЧЕРЕЗ ПЛАСТИНУ-ФЛАЕР Григорьев А.Н., Борщевский М.А., Матвеев И.В., Лубенченко Н.А.	92
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА Данилов Н.Е.	102

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КАМЕРЫ В УСЛОВИЯХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ Доценко В.В., Жабунина О.Ю., Лушина Ю.Ю., Никульшин М.В.	107
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР УДАРНОГО СЖАТИЯ ТЭНА Ковалев Ю.М., Шестаков М.А.	110
РАСЧЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ВОДОРОДОМ СТЕНДА КУПОЛ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА Кутузова К.С., Безгодов Е.В., Попов И.А., Пасюков С.Д.	114
РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТОКОНЕСУЩЕЙ СИСТЕМЕ «ФЛАЕР – ОБРАТНЫЙ ТОКОПРОВОД» Лубенченко Н.А., Григорьев А.Н., Строков А.Д.	117
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИММОБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ПЕРЛИТНЫХ ПУЛЬП В НЕВОЗВРАТНЫЙ КОНТЕЙНЕР НЗК-150-1,5П Монстаков Д.А., Старовойтов Н.П., Дудкин В.А., Козлов П.В.	125
ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ И СЛИВА БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ИЗ УДАЛЯЕМОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ДИЗАЙНА ФГУП «ПО «МАЯК» Понькин Е.И., Шайдуллин С.М., Дудкин В.А.	127
ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОФИЗИКИ Свердлов В. И., Григорьев А. Н.	131
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Середкин Н.Н., Хищенко К.В.	136
АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРОХОЖДЕНИЯ В СЛУЧАЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ Скрябин С.Н., Садыков Н.Р.	138
ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВ МЕТОД КУРОПАТЕНКО РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМЫХ СРЕД Стариков Я.Е., Шестаковская Е.С., Макеева И.Р.	143
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО АЗОТА НА ПОВЕРХНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ Стаханов В. В., Юрин Д. О., Тараканов А. А.	146
МОДЕЛИ ТЕРМОДИНАМИКИ МАТЕРИАЛОВ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ Хищенко К.В.	149
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ЦИЛИНДР-ТЕСТ Шестаковская Е.С., Яловец А.П., Клиначева Н.Л., Шершнева О.А.	151

УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ ДЛЯ РАЗНЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В УДАРНОЙ ТРУБЕ Яковлев С.А., Безгодов Е.В., Пасюков С.Д., Никифоров М.И., Тараканов А.А., Серебряк В.Г.	154
ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ Ярушин К. М.	157
<b>Секция 3.</b>	
<b>ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА Бугаенко А.А., Крутова И.Ю.	161
АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО Казачинский А.О., Крутова И.Ю.	165
ДВУМЕРНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ УРАВНЕНИЯМИ ДВИЖЕНИЯ Карелина О.А.	167
ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ПОТОКОВ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НАГРЕВА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ Кононов С.Н.	172
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА Крутова И.Ю.	174
МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ХОДЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА Латыпов А.А., Лебедев С.Н., Овечкин А.А.	176
ПОЯВЛЕНИЕ ЗАКРУТКИ В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ Левунина Э.С.	191
ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РЯДА $c_n$ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА В ВАКУУМ НА КОСОЙ СТЕНКЕ Понькин Е.И.	194
ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ С УЧЕТОМ РЕФРАКЦИИ И ОТРАЖЕНИЯ Юсупов Ю. Ф., Глазырин И. В., Говрас Е. А., Михайлов Н. А., Титова А. М.	197

**Секция 4.**

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ**

РЕАЛИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ C# Брегед А.И., Липатов А.Н.	201
КОНЦЕПТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОМОЩНИКА ДЛЯ ПЕЧИ ОСТЕКЛОВАНИЯ Вершинин Д.В., Горский Ю.А., Мельникова Н. В., Евстратов Д.С., Никитин Г.И.	203
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ Исупова А.А.	209
ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ Машкин А.Н., Романова А.А., Сивков С.И.	212
АНАЛИЗ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ И МЕТОДОВ СКАНИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ Машкин А.Н., Романова А.А., Сивков С.И.	215
ОБЗОР МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ДЛЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ Минаев А.С., Фёдоров В.В.	218
РАЗРАБОТКА МЕТОДА СЖАТИЯ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА С СОХРАНЕНИЕМ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ Михайлов А.Ф.	222
АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ Мякушко Э.В. Сагайдачная П.В. Агеев Г.А.	225
СЕГМЕНТАЦИЯ ФЛОТАЦИОННОЙ ПЕНЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ Пыхов В.В.	227
СХОЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА FR-4 Шульгин А. Н., Шахова О.А., Евсеев Г.А., Тебайкин Д.С.	233

**Секция 5.**

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ИНТЕРЕСАХ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО САМООПРЕДЕЛЕНИЯ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ Бочкарева О.Н., Линник О.В., Певнева Н.А.	241
ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОДНА ИЗ ДВИЖУЩИХ СИЛ РАЗВИТИЯ Горин Н.В., Водолага Б.К., Кузнецов Е.В.	245
ТРЕТЬЯ МИССИЯ УНИВЕРСИТЕТА: РАЗВИТИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ ПРАКТИК ПРИВЛЕЧЕНИЯ МОЛОДЕЖИ В ЗАКРЫТЫЕ ГОРОДА РОСАТОМА Линник О.В., Певнева Н.А.	250
ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ В ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ Логутов К.Д.	255
РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «АТОМНАЯ АЗБУКА» Логутов К.Д.	257
ЛАБОРАТОРИЯ «ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ» КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ПРИВЛЕЧЕНИЯ ШКОЛЬНИКОВ К ИЗУЧЕНИЮ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Баширова И.А., Сергеев Н.А.	260
ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ Садовский А.А.	263
<b>Алфавитный указатель авторов</b>	266
<b>Организации</b>	268



## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА ПРОЦЕСС СКАНИРОВАНИЯ**

Бологов А.В., Голунов А.А., Горбатов А.Д.  
*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*  
[Bologovandrey98@gmail.com](mailto:Bologovandrey98@gmail.com), [alesha\\_0502@mail.ru](mailto:alesha_0502@mail.ru), [gorbatov2001@mail.ru](mailto:gorbatov2001@mail.ru)

### Аннотация

3D-сканирование является неотъемлемой частью реверс инжиниринга – стремительно развивающегося метода разработки конструкторской документации. Множество экспертов в этой области и сами производители 3D-сканеров рекомендуют для наилучших результатов проводить сканирование в специальных комнатах без посторонних источников света. В реальности же добиться идеализированных условий для сканирования бывает невозможным, а также работа человека в таком помещении сильно затрудняется.

В данной работе проводятся несколько опытов с подбор оптимального светового потока и положения источника света относительно изучаемого объекта при 3D-сканировании. Исследования доказывают, что и при постороннем источнике света сканированные данные близки к идеализированным. Также в ходе анализа полученных данных была получена зависимость от места нахождения источника и степени его светового потока.

*Ключевые слова: 3D-сканирование, технологии, производство.*

## **THE EFFECT OF LIGHTING PARAMETERS ON THE SCANNING PROCESS**

Bologov A.V. Golunov A.A. Gorbatov A.D.  
*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky  
Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI",  
Chelyabinsk region.*  
[Bologovandrey98@gmail.com](mailto:Bologovandrey98@gmail.com), [alesha\\_0502@mail.ru](mailto:alesha_0502@mail.ru), [gorbatov2001@mail.ru](mailto:gorbatov2001@mail.ru)

### Annotation

3D scanning is an integral part of reverse engineering, a rapidly developing method of developing design documentation. Many experts in this field and manufacturers of 3D scanners themselves recommend scanning in special rooms without extraneous light sources for the best results. In reality, it can be impossible to achieve idealized scanning conditions, and human work in such a room is very difficult.

In this work, several experiments are carried out with the selection of the optimal luminous flux and the position of the light source relative to the object under study during 3D scanning. Research proves that even with an external light source, the scanned data is close to idealized. Also, during the analysis of the data obtained, a dependence was obtained on the location of the source and the degree of its luminous flux.

*Keywords: 3D scanning, technology, production.*

### Гипотеза:

Можно предположить, что сканирование объектов происходит эффективнее в тёмном помещении без влияния постороннего света.

### Актуальность:



В настоящее время процесс сканирования является неотъемлемой частью создания цифровых двойников физических объектов, вследствие этого необходимо изучать и внедрять наиболее эффективные методы сканирования объектов.

Проблематика:

Часто пользователи 3D-сканеров сталкиваются с обильным количеством шума из-за бликов на объекте, которые мешают камерам зафиксировать точные искажения света на определенных участках поверхности. Наличие бликов обуславливается средой, в которой находится объект, поэтому необходимо создать такое окружение, в котором объект будет подвержен наименьшему количеству освещения из вне.

Содержание работы

Исследование влияния света на сканирование будет проводиться по схеме, представленной на рисунке 1 и будет включать 3 опыта.

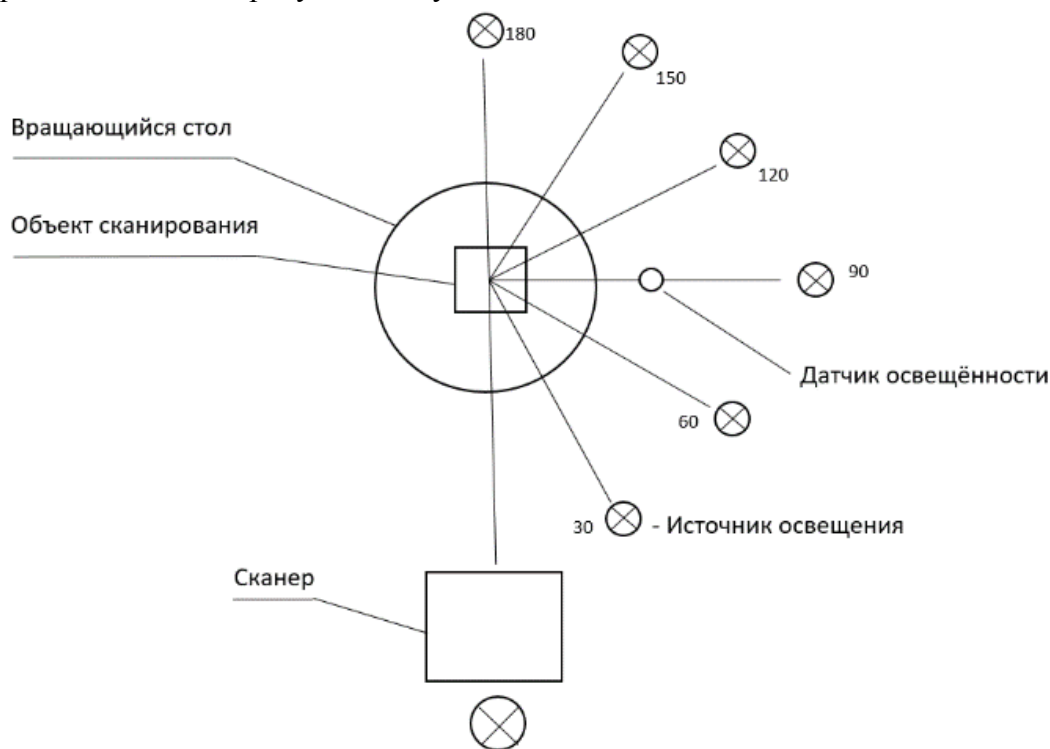


Рисунок 1 – Схема зоны сканирования

Опыт 1.

Объект сканирования окрашен матирующей краской. Сканируется объект в 2-х положениях.

Источник освещения белый. Яркость меняется 10 раз. В позиции “0” источник света имеет 2 положения:

над сканером;

под сканером.

Датчиком освещения контролируется яркость источника света.

#### Опыт 2.

Объект сканирования окрашен матирующей краской. Сканируется объект в 2-х положениях.

У источника освещения меняется цвет. В позиции “0” источник света имеет 2 положения:

над сканером;

под сканером.

Датчиком освещения контролируется яркость источника света.

#### Опыт 3.

У объекта сканирования меняется цвет. Сканируется объект в 2-х положениях.

Источник освещения белый. Яркость меняется 10 раз. В позиции “0” источник света имеет 2 положения:

над сканером;

под сканером.

Датчиком освещения контролируется яркость источника света.

Также в ходе проведения данных опытов будет проведён анализ полученных результатов и сформулированы дальнейшие задачи для повышения эффективности сканирования 3D объектов и внедрения в производственные циклы.

#### *Использованные источники:*

1. 3D-сканирование в интересах 3D-моделирования [Электронный ресурс] / URL: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php?ID=40134>
2. Обзор производителей оптических измерительных систем и их продукции: часть I [Электронный ресурс] / URL: <http://mastermodel.ru/articles/obzor-proizvoditeley-opticheskikh-izmeritelnyh-sistem-i-ih-produkcii-chast-i>

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕПАРАТОВ СЕРИИ «ВЫБОР» ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Габбасова Н.Р., Кузнецова Н.А., Сахненко О.А.  
ФГУП «Производственное объединение «Маяк», Озерск, Челябинская обл.  
[cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

В работе рассмотрены новые дезактивирующие растворы, предложенные для дальнейшего применения на радиохимическом производстве. Оценено коррозионное воздействие данных препаратов на конструкционные материалы. Приведены результаты исследований по отмывке технологического оборудования.

*Ключевые слова:* Дезактивация, дезактивирующий раствор, радиоактивное загрязнение, степень очистки, ультразвук, ванна ультразвуковая

## EVALUATION OF THE POTENTIAL FOR USING CLEANING AGENTS FROM PRODUCT LINE «VYBOR» FOR DECONTAMINATION OF THE RADIOCHEMICAL PLANT EQUIPMENT

Gabbasova N.R., Kuznetsova N. A., Sakhnenko O. A.  
The Mayak Production Association, Ozyorsk  
[cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

The work examination solutions proposed for further use in radiochemical production. The corrosive effect of these preparations on structural materials has been assessed. The results of research on cleaning technological equipment are presented.

*Key words:* Decontamination, decontaminating solution, radioactive contamination, degree of purification, ultrasound, ultrasonic bath

На предприятие поступает много коммерческих предложений, рекламирующих различные технические моющие средства (далее – ТМС). Подбор новых дезрастворов является актуальным направлением, так как позволяет найти ТМС, сокращающие время проведения дезактивационных работ.

В работе исследовали технические моющие средства серии «Выбор» марок «Выбор-К» и «Выбор-КС» производства ЧП Кембрин (г. Пермь). В состав средств входят смесь ПАВов в сочетании с комплексообразующими веществами, минеральными и органическими кислотами.

В рамках работы были проведены лабораторные и опытно-промышленные испытания моющих средств серии «Выбор» на предмет оценки их дезактивирующей способности при отмывке технологического оборудования радиохимического завода, а также коррозионного воздействия их на конструкционные материалы.

Средство	Вид загрязнения	Исходное загрязнение $A_0$ , част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$	Остаточное загрязнение после, част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$			Коэффициент дезактивации за три цикла
			1 цикл	2 цикл	3 цикл	
В присутствии ультразвука						
Нержавеющая сталь, температура 60 °С						
Выбор-К	α	3665	226	25	4,0	916
	β	6090	39,5	1,0	фон	> 1015
Выбор-КС	α	3720	230	104	44	85
	β	7520	8,0	1,0	фон	> 1253

Углеродистая сталь, температура 60 °С						
Выбор-К	α	1020	8,0	2,6	1,0	1020
	β	5880	фон	–	–	> 980
Выбор-КС	α	1195	11,0	1,0	1,0	1195
	β	5770	фон	–	–	> 960
В отсутствии ультразвука						
Нержавеющая сталь, температура 60 °С						
Выбор-К	α	1230	219,6	66,5	43,0	29
	β	1320	9,8	фон	–	> 220
Выбор-КС	α	2000	67,8	39,9	28,0	71
	β	1240	10,0	фон	–	> 206
Углеродистая сталь, температура 60 °С						
Выбор-К	α	1570	124,6	73,3	42,8	36,7
	β	2665	19,0	фон	–	> 444
Выбор-КС	α	1870	152,0	66,1	48,3	38,7
	β	2700	18,5	фон	–	> 450

Табл. 1- Результаты дезактивации образцов конструкционных материалов в лабораторных условиях

Лабораторные испытания показали (см. табл. 1), что исследуемые препараты серии «Выбор» обладают высокой дезактивирующей способностью по отношению к конструкционным материалам (углеродистой и нержавеющей сталям).

При проведении опытно-промышленных испытаний в условиях радиохимического производства дезактивации подвергали образцы из нержавеющей стали со сварным швом правильной геометрии размером 70x70x20 мм, вырезанные из демонтированного оборудования. Дезактивацию осуществляли погружным методом, как с наложением ультразвука, так и без ультразвука при температуре (60 ± 5) °С циклами продолжительностью по 30 мин. Результаты приведены в таблице 2. Эффективность исследуемых средств оценивали сравнением с результатами, полученными при использовании штатного дезактивирующего раствора состава: 50 г/дм<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub> + 10 г/дм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Средство	Наличие ультразвука	Исходное загрязнение A <sub>0</sub> , част./(см <sup>2</sup> ·мин)	Остаточное загрязнение после, част./ (см <sup>2</sup> ·мин)			Коэффициент дезактивации
			1 цикл	2 цикл	3 цикл	
Для бета-загрязненных образцов						
Выбор-К	–	9900	2530/145	1000/31	820/22	12,1
	+	8000	570/6	370/фон	100/фон	80,0
Выбор-КС	–	3100	690/55	350/6	315/8	9,8
	+	3200	160/20	65/фон	15/фон	213,3
50 г/дм <sup>3</sup> HNO <sub>3</sub> + 10 г/дм <sup>3</sup> H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	4850	200/12	170/5	70/24	69,3
	+	3450	60/11	35/фон	9/фон	383,3
Для альфа-загрязненных образцов						
Выбор-К	–	45	37/3,0	15/0,7	13/фон	3,5
	+	44	9/фон	5,0/фон	2,8/фон	15,7
Выбор-КС	–	50	25/0,5	16/фон	16/фон	3,1
	+	360	24/фон	12,5/фон	10/фон	36,0
50 г/дм <sup>3</sup> HNO <sub>3</sub> + 10 г/дм <sup>3</sup> H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	33	17/1,7	16/фон	15/фон	1,9
	+	62	13/фон	2/фон	2/фон	31,0

Табл. 2 - Результаты дезактивации образцов демонтированного оборудования

Из таблицы 2 видно, что дезактивация образцов препаратами серии «Выбор» методом погружения недостаточно эффективна. Наложение ультразвука (далее – УЗ) позволило повысить эффективность дезактивации до 25 раз. Отмечено, что применение азотно-оксалатного раствора позволило отмыть бета-загрязненные образцы за один цикл дезактивации в ультразвуковой ванне до норм ремонтно-пригодности (300 бета-част./ (см<sup>2</sup>·мин)) оборудования. Коэффициенты дезактивации у штатного раствора до пяти раз выше аналогичных значений у препаратов серии «Выбор». Однако, данный раствор применим только для дезактивации оборудования из нержавеющей стали (см. Табл. 3).

Эффективности отмытки образцов от альфа-радионуклидов препаратами «Выбор-К», «Выбор-КС» и штатного раствора сопоставимы.

Установлено, что исследуемые препараты оказывают щадящее коррозионное воздействие на конструкционные материалы. Скорость коррозии нержавеющей и углеродистой сталей после трех циклов обработки в ультразвуковой ванне не превышала 0,2 г/(м<sup>2</sup>·ч) и 2,58 г/(м<sup>2</sup>·ч), соответственно (см. табл. 3). В случае применения штатного раствора при ультразвуковой дезактивации образцов из углеродистой стали скорость коррозии превышала в 700 раз аналогичные значения, полученные при использовании коммерческих препаратов серии «Выбор».

Дезактивирующий раствор	Температура раствора, °С	Скорость коррозии V <sub>к</sub> , г/(м <sup>2</sup> ·ч)			
		1 цикл	2 цикл	3 цикл	Суммарная скорость коррозии за три цикла
Нержавеющая сталь					
30 г/дм <sup>3</sup> Выбор-К	(60±2)	0,16	0,23	0,13	0,17
20 г/дм <sup>3</sup> Выбор-КС	(60±2)	0,07	0,13	0,38	0,20
50 г/дм <sup>3</sup> HNO <sub>3</sub> + 10 г/дм <sup>3</sup> H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(60±2)	0,26	0	0	0,14
Углеродистая сталь					
30 г/дм <sup>3</sup> Выбор-К	(60±2)	2,12	2,68	2,24	2,35
20 г/дм <sup>3</sup> Выбор-КС	(60±2)	2,44	2,58	2,87	2,58
50 г/дм <sup>3</sup> HNO <sub>3</sub> + 10 г/дм <sup>3</sup> H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(60±2)	1528,5	1762,4	1482,8	1591,0

Табл. 3 - Скорость коррозии конструкционных материалов в исследуемых дезактивирующих растворах методом погружения в присутствии УЗ

По результатам работы препараты серии «Выбор» были рекомендованы к использованию в подразделениях ФГУП «ПО «Маяк» и в настоящее время активно используются на радиохимическом предприятии.

*Использованные источники:*

1. Зимон А.Д. Дезактивация: учебное пособие / А.Д. Зимон, В.К. Пикалов – Москва: ИздАт, 1994. – 336 с.
2. Опыт ультразвуковой дезактивации съемного оборудования радиохимического производства: пособие/ сост.: М.В. Ерофеева, Н.А. Кузнецова, О.А. Сахненко, Ю.В. Козина. – Озёрск, 2019.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИЛИНДРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ежов Р.А., Мирошкин З.К., Орлова Н.Ю., Пильшиков А.А., Кирсанов В.А.  
*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,  
Снежинск, Челябинская обл.*

В работе представлены результаты оптимизации пространственной геометрии деталей узла в целях повышения технологичности и уменьшения массы изделия на основе комплексного использования возможностей селективного лазерного плавления при изготовлении. Это позволило уменьшить массу изделия на 52,4%, сократить время механообработки на 62%, уменьшить себестоимость изделия на 41%.

*Ключевые слова: топология, оптимизация конструкции, 3D-печать по SLM технологии, аддитивные технологии.*

## OPTIMIZATION OF HYDRAULIC CYLINDER DESIGN USING ADDITIVE TECHNOLOGIES.

Ezhov R.A., Miroshkin Z.K., Orlova N.Yu., Pilshchikov A.A., Kirsanov V.A.  
*Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University  
MEPhI, Chelyabinsk region.  
FSUE "RFNC-VNIITF named after. academic E.I. Zababakhin",  
Snezhinsk, Chelyabinsk region.*

The paper presents the results of optimization of the spatial geometry of the assembly parts in order to increase manufacturability and reduce the weight of the product based on the integrated use of the capabilities of selective laser melting during manufacturing. This made it possible to reduce the weight of the product by 52.4%, reduce machining time by 62%, and reduce the cost of the product by 41%.

*Keywords: topology, design optimization, 3D printing using SLM technology, additive technologies.*

Одним из основных государственных приоритетов является обеспечение обороноспособности и безопасности РФ. Активно ведутся разработки новейших перспективных изделий, комплексов, приборов и систем. Одним из способов повышения эффективности вновь разрабатываемых устройств является оптимизационное проектирование на основе топологического анализа с учётом максимального использования возможностей аддитивных технологий, в частности селективного лазерного плавления (SLM технология). Особенно высокую эффективность использование аддитивных технологий показывает в экспериментальном, единичном и мелкосерийном типе производства, что позволяет значительно ускорить процесс разработки новых изделий. Аддитивные технологии позволяют применять решения по оптимизации конструкции геометрии, значительно улучшающие как прочностные, так и массогабаритные характеристики изделий.

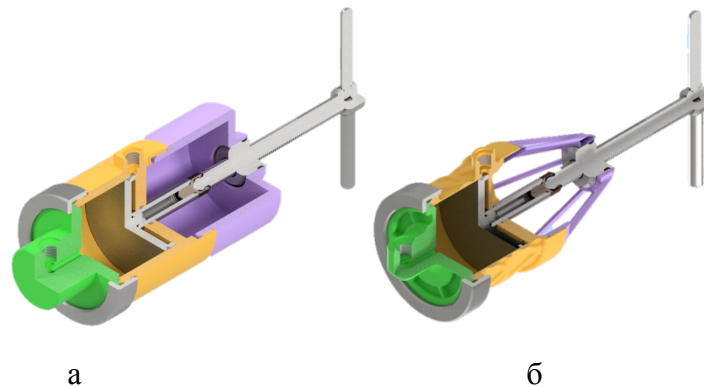


Рисунок 1 – Исходная конструкция (а), оптимизированная конструкция (б)

В ходе выполнения настоящей работы был проведен анализ конструкции гидроцилиндра (рисунок 1а), составлен возможный технологический процесс по традиционные изготовления, который показал, что коэффициент использования материала (КИМ) основных деталей составляет от 0,18 до 0,29. Станочное время механической обработки основных деталей - 429 минут, т.е. более 7 часов. Это показывает малую эффективность.

При выполнении топологической оптимизации узла с учетом приложенных на него нагрузок была получена конструкция, приведённая на рисунке 1б. Данная конструкция сохраняет все эксплуатационные характеристики исходного изделия, но при этом масса всего изделия уменьшилась на 52,4%, отдельных деталей на 81%, время механической обработки сократить на 62%, себестоимость уменьшилась на 41%, КИМ повысился в среднем до 0,87. Разработан технологический процесс изготовления с использованием SLM технологии. Были разработаны технические условия для печати деталей методом SLM, учитывающие особенности контроля и печати деталей со сложной геометрией. Была выполнена пробная печать 3-х основных изделий на 3D принтере. 3D LAM, которая подтвердила возможность изготовления. В дальнейшем данная конструкция будет передана на испытания предприятию заказчику.

Таким образом, использование топологической оптимизации при разработке изделий позволит значительно повысить эксплуатационные качества изготавливаемых узлов, при этом значительно ускорится процесс отработки новых изделий при уменьшении затрат.

*Использованные источники:*

- 1 Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. – Санкт -Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 63с.
- 2 Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. - Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
- 3 Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш /пособие для инженеров. – Москва: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. - 220 с.
- 4 Исследование материала, полученного с применением 3D технологий, после термической обработки. Протокол Р160-Пр3513. Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ, 2021. -26 с.
- 5 Рахимьянов, Х. М. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов / Х. М. Рахимьянов, Б. А. Красильников, Э. З. Мартынов. — 3-е изд. — Москва: Издательство Юрайт, 2017. — 252 с.
- 6 Сорокина В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин – Москва: Книга по Требованию, 2012. – 640 с.
- 7 Толченев Т.В. Техническое нормирование станочных и слесарно - сборочных работ. Санкт-Петербург: 1-я типография Машгиза, 1956. - 400 с.



## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Задворнова О.В, Орлова Н.Ю.

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*

[OVZadbornova@mephi.ru](mailto:OVZadbornova@mephi.ru), [NYOrlova@mephi.ru](mailto:NYOrlova@mephi.ru)

В статье описан анализ опасных и вредных факторов при взаимодействии веществ на различных этапах селективного лазерного плавления реактивных металлических порошков на экспериментальном аддитивном оборудовании.

*Ключевые слова: Аддитивное производство, SLM технология, опасные и вредные производственные факторы, безопасность.*

## ENSURING SAFETY OF WORK WITH METAL POWDERS WHEN ORGANIZING ADDITIVE MANUFACTURING

O.V. Zadbornova<sup>1</sup>, N.Yu.Orlov

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology – branch of the federal state autonomous educational institution of higher education “National Research Nuclear University “МЕРФИ”, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia*

The article describes the analysis of dangerous and harmful factors during the interaction of substances at various stages of selective laser alloying of reactive metal powders on experimental additive equipment.

*Keywords: Additive manufacturing, SLM technology, hazardous and harmful production factors, safety.*

Обеспечение безопасности является одной из ключевых задач для такой быстро развивающейся отрасли как аддитивное производство (АП) / аддитивные технологии (АТ) / 3D печать.

Вместе с потенциальными преимуществами, применение 3D печати поднимает острые вопросы законодательства и регулирования. Существует ряд факторов, которые тормозят процесс внедрения аддитивных технологий в реальный производственный процесс.

Одним из таких факторов является отсутствие нормативной базы. Разработка которой идет в настоящее время в основном в направлениях нормирования/определения свойств, показателей качества, возможных областей использования. Работ, рассматривающих вопросы обеспечения безопасности при работе с металлическими порошками при организации аддитивного производства, нет. В связи с этим, идентификация и анализ опасных и вредных производственных факторов исходных материалов для аддитивного производства представляется наиболее актуальным. Особенно это актуально для экспериментальных и исследовательских установок, когда происходит отработка режимов печати металлических порошков с различными химическими, физическими и технологическими свойствами в разных условиях и различной последовательности загрузки порошков в установку. При этом, остаточное загрязнение установки могут привести к нежелательным взаимодействиям с образованием токсических и взрывоопасных веществ.

Наиболее перспективной и эффективной технологией печати металлическими порошками являются технология SLM (Selective Laser Melting) выборочное лазерное плавление порошков заключается в формировании слоя металлического порошка с



последующим его выборочным плавлением под действием энергии луча лазера. Рассмотрим эту технологию более подробно.

### Анализ данных и построение изделия:



Рисунок 1- Схема SLM технологии [1]

Первые три этапа – операции подготовки электронной геометрической модели осуществляют автоматизированно, при помощи специализированного программного обеспечения, требования к безопасности работы с которым определена.

Следующий этап - подготовка метало-порошковой композиции (МПК) с фракционным составом 0-60мкм, размещение порошка в системе хранения, просеивание.

Металлические порошки при использовании их для SLM технологий, как известно, делятся на две резко отличающиеся по химическим свойствам группы: нереакционные сферические порошки, изготовленные из нержавеющей, мартенситных и инструментальных сталей, а также химически активные порошки алюминия, титана и их сплавов.

На этом подготовительном этапе можно идентифицировать следующие опасные и вредные производственные факторы (ОиВПФ) [2,5]:

- просыпание порошка при загрузке/просеивании;
- образование аэрогели (порошки (пыли), осевшие из воздуха на поверхность или находящиеся в слое);
- образование аэрозоли (порошки (пыли), находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе);
- пирофорность и взрывоопасность;
- возможность возникновения инициаторов воспламенения порошков;
- попадание порошка (пыли) на кожу/слизистые оболочки;
- попадание порошка (пыли) во внутрь организма;
- возможность травмирования при скольжении на пыльной поверхности.

Вещество может проникать в организм при вдыхании пыли, вызывая раздражающее воздействие на глаза и дыхательные пути, вызывая покраснение, боль в глазах и в горле, кашель, сбивчивое дыхание. Повторное попадание в легкие приводит к их повреждению. Самой опасной для человека считается порошок (пыль) дисперсностью до 7 мкм. Ее частицы проникают в легочную ткань, накапливаются там и могут спровоцировать заболевание. Порошок (пыль) дисперсностью свыше 10 мкм остается на слизистой верхних дыхательных путей и удаляется посредством кашля или чихания.

Аэрогели металлических порошков пожароопасны, они воспламеняются от инициатора зажигания, а некоторые из них при определенных условиях самовозгораются.

Аэрозоли металлических порошков представляют особую опасность, поскольку, подобно газовым смесям, могут при воспламенении взрываться. Высокодисперсные порошки способны создавать устойчивое аэрозольное облако.

Воспламенение аэрозолей и аэрогелей порошков происходит в результате одновременного появления трех факторов:

- концентрация аэрозоля выше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР);

- содержание кислорода в атмосфере выше минимального взрывоопасного содержания кислорода (МВСК);

- наличие инициатора воспламенения, обладающего энергией выше минимальной энергии зажигания.

Возможные инициаторы воспламенения: искры механического происхождения, искры электрического; статическая электризация порошка; нагрев порошка (при нарушении защитной оксидной пленки при взаимном трении частиц, а также при их трении об инструмент и детали оборудования, от тепловых проявлений химических реакций); горящие или накалившиеся тела[3]

Опасность возрастает по мере увеличения дисперсности порошка.

На четвертом этапе 3D печати идет создание слоя металлического порошка композиции (МПК) в инертной среде (аргон, азот). Во время технологического процесса 3D печати все процессы, включая фильтрацию проходят в среде инертных газов, что не позволяет окисляться мелкодисперсному порошку. Это условие достаточное для защиты от воспламенения аэрозолей порошков.

Количество энергии, подаваемое лазером в единичную точку при формировании слоя, зависит от мощности лазера и времени воздействия. Эта подаваемая лазером энергия может значительно превысить температуру плавления компонентов МПК, что приводит к частичному испарению материала построения. Испаряемые вещества в рабочей зоне принтера, заполненного инертным газом переносятся в систему фильтрации, где осаждаются в виде мелкодисперсной фазы. Вероятно, что этих веществ в МПК может быть в процентном соотношении не так много, но они имеют более низкую температуру плавления и /или малую энергию выхода. В частности, такими свойствами обладает магний, который часто используется как легирующий элемент в сплавах алюминия, например, АК4 (Mg до 1,8%), Д19 (Mg до 2,3%), ВАД 1 (Mg до 2,7%)[4].

На этапе 3D печати определяются следующие опасные и вредные производственные факторы:

- лазерное излучение;
- подача защитного газа;
- повышенная концентрация инертного газа в окружающем воздухе;
- высокое электрическое напряжение;
- сжатый воздух;

Лазерное излучение опасно для глаз и может разрушить сетчатку, вызвать ожоги кожных покровов. Лазерное излучение может стать причиной пожара и взрыва. Необходимо постоянно контролировать концентрацию инертного газа в окружающем воздухе и низкую концентрацию кислорода (<19,5%) Газообразный аргон не имеет запаха, но при этом является удушающим веществом, поскольку он тяжелее воздуха и вытесняет кислород. Это создаёт потенциальную опасность удушья. Опасность, связанная с высоким электрическим напряжением, возникает при прикосновении к токопроводящим деталям, любое повреждение изоляции или отдельных компонентов может быть опасным для жизни. Электронные компоненты могут накапливать электрические заряды, которые сохраняются даже после выключения компонентов от источника питания. Опасные для жизни напряжения могут присутствовать на кабеле питания, блоке питания, усилителе привода, питании лазера. Опасность, связанная с сжатым воздухом, может быть причинена вращающимися шлангами, поднятой пылью и движением пневматических приводов.

Риск возникновения аварийной ситуации значительно повышается после окончания техпроцесса. При завершении 3D печати, подача инертного газа прекращается, заготовка извлекается из камеры аддитивной установки для последующей обработки. Особое внимание нужно уделять извлечению заготовки из камеры, в виду наличия следующих опасных и вредных производственных факторов[2,5]:

- высоких температур поверхности деталей, наличия острых кромок и заусенцев, достаточно большой массы заготовки (до 30кг.) и как следствие – возможность падения

заготовки на ноги оператора или пол, возможность преднамеренного запуска, большого количества свободного порошка, наличия инициаторов зажигания, высокой скорости окислительных реакций при поступлении кислорода воздуха. Выемка и утилизация фильтров представляют высокую опасность в следствии наличия в фильтре мелкодисперсных пирофорных элементов, в том числе легирующих, таких как магний или титан.

Существующие опасные и вредные производственные факторы, возникающие при работе с аддитивными установками необходимо учитывать при проведении анализа возможных уровней опасности для последующего внедрения системы управления охраной труда при работе с аддитивными технологиями.

*Использованные источники:*

1. Гопиенко В. Г. [и др.]; под ред. чл.-кор. РАН, проф. А. И. Рудского. «Металлические порошки алюминия, магния, титана и кремния. Потребительские свойства и области применения» – Санкт - Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 356 с.
2. Орлова Н. Ю., Горбатов И. В., Орлов Ю. А., Антюфеев В. А., Тельгерекова Т. В. «Определение геометрической точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения, получаемых в зависимости от расположения в рабочем пространстве принтера, по технологии селективного лазерного плавления из стали марки 12Х18Н10Т» Вестник концерна ВКО «Алмаз –Антей». — 2019. — № 1. — С. 59-67.
3. Задворнова О.В, Орлова Н. Ю. «Анализ потенциальных рискообразующих факторов аддитивного производства» Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2020 по направлению инновационные ядерные технологии. 22-23.12 2020г., с.22-24
4. ГОСТ Р 4784—2019 Алюминии и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки
5. ГОСТ Р 59036—2020 Аддитивные технологии. Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков. Общие положения.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКОВ ПОСЛЕ 3D-ПЕЧАТИ

Казаков И.А., Гнеушев Н.В., Горбатов А. Д.  
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[vania.ru74@mail.ru](mailto:vania.ru74@mail.ru), [Nikg2015@mail.ru](mailto:Nikg2015@mail.ru), [gorbatov2001@mail.ru](mailto:gorbatov2001@mail.ru)

В докладе рассмотрены вопросы возможности вторичного использования полилактида в 3D печати, а так же создание устройства для создания филамента из отходов полилактида.

*Ключевые слова: 3D печать, аддитивное производство, технологии, PLA, экструдер*

### DESIGN OF A DEVICE FOR FILAMENT SPLICING

Kazakov I.A., Gneushev N.V., Gorbatov A.D.  
FGAOU VO "Snezhinsk Institute of Physics and Technology of National Research Nuclear  
University MEPHI", Chelyabinsk Oblast, Russia.  
[vania.ru74@mail.ru](mailto:vania.ru74@mail.ru), [Nikg2015@mail.ru](mailto:Nikg2015@mail.ru), [gorbatov2001@mail.ru](mailto:gorbatov2001@mail.ru)

The report discusses the possibility of recycling polylactide in 3D printing, as well as the creation of a device for creating a filament from polylactide waste.

*Key words: 3D printing, additive manufacturing, technologies, PLA, extruder*

С развитием промышленности и повышением спроса на пластик в середине 20-го века, возникла необходимость в поиске способов его переработки для повторного использования. В 1970-х годах стала возрастать осознанность об экологических проблемах, связанных с накоплением пластиковых отходов, и начало активное развитие технологий по переработке пластика.

Одним из первых устройств по переработке пластика стал пластиковый гранулятор, который позволял измельчать и перерабатывать пластиковые отходы в форму гранул. Это позволило повторно использовать пластик для производства новых изделий.

Затем появились автоматические линии по переработке пластика, которые включали в себя различные этапы обработки, такие как измельчение, очистка, сортировка и плавление пластика. Такие линии стали использоваться на промышленных предприятиях для полномасштабной переработки пластиковых отходов.

В лаборатории аддитивных технологий при постоянной печати образуется большое количество отходов в виде остатков поддерживающих структур, а также неудавшихся печатей. В год образуется более 20 кг отходов, что является слишком большим объемом для утилизации, но слишком малым объемом для покупки дорогостоящего профессионального оборудования. Поэтому было принято решение о создании экспериментального образца устройства. Для достижения результатов были выполнены следующие задачи:

1. Проанализирован рынок существующих аналогов.
2. Изучены свойства материалов.
3. Разработка концепции устройства.
4. Создание рабочего прототипа.

Самым часто используемым материалом для 3д печати в нашей лаборатории является полилактид (PLA), поэтому он был выбран как материал для подбора режимов настройки устройства. Схема была выбрана схожей со схемой промышленных устройств (измельчение

отходов – отчистка – нагревание – экструзия через сопло – контроль пластиковой нити – намотка на катушку).

В результате проделанной работы нам удалось создать экспериментальный образец устройства по переработке и экструзии, а также удалось получить экструдированный пластик, однако диаметр получаемого прутка отличался на 50% от необходимого диаметра, который составляет 1.75 мм. Для устранения этих дефектов будут проведены дополнительные опыты по изучению влияния скорости и температуры на размер получаемого материала.

*Использованные источники:*

1. Баур Э., Освальд Т. А., Рудольф Н. Перевод с английского/ под ред. Н. Н. Тихонова, М. А. Шерышева. Настольная книга переработчика пластмасс. Справочник по полимерным материалам, 2021. — 672 с.
2. Раувендааль К., Перевод с английского/ под ред. О. И. Абрамушкиной. Основы экструзии. 2-е издание, 2021. – 320 с.
3. Раувендааль К, Норьега М. П. Перевод с английского/ под ред. О. И. Абрамушкиной. Выявление и устранение проблем в экструзии 3-е издание. Систематический подход к решению проблем, 2021. – 328 с.

## ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРОНШТЕЙНА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Казаков<sup>2</sup> И.А.; Каримов<sup>2</sup> Р.А.; Кирсанов<sup>1</sup> В.А.; Орлова<sup>2</sup> Н.Ю.

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

[vania.ru74@mail.ru](mailto:vania.ru74@mail.ru), [ruslan80plus@gmail.com](mailto:ruslan80plus@gmail.com), [kv1989@yandex.ru](mailto:kv1989@yandex.ru), [nyorlova@mephi.ru](mailto:nyorlova@mephi.ru)

Аннотация. Изготовление деталей с помощью аддитивных технологий позволяет значительно усложнить пространственную геометрию отдельной детали/узла, а в целом упростить механизм при сохранении эксплуатационных свойств. В данной работе представлен пример топологической оптимизации узла, состоящего из 3 основных деталей и 27 крепёжных изделий. В оптимизированной конструкции 2 основных детали и 12 крепёжных изделий. Время изготовления только основных деталей сократилось на 36%.

*Ключевые слова:* Топологическая оптимизация, технология SLM, 3D печать, аддитивное производство.

## TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE BRACKET DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS USING THE METHOD OF ADDITIVE TECHNOLOGIES.

Kazakov<sup>2</sup> I.A.; Karimov<sup>2</sup> R.A.; Kirsanov<sup>1</sup> V.A.; Orlova<sup>2</sup> N.Y.

<sup>1</sup>FGUP «RFYATS-VNIITF named after Academician E.I. Zababakhina», Snezhinsk, Chelyabinsk Oblast.

<sup>2</sup>FGAOU VO «Snezhinsk Institute of Physics and Technology of National Research Nuclear University MEPHI», Chelyabinsk Oblast, Russia.

[vania.ru74@mail.ru](mailto:vania.ru74@mail.ru), [ruslan80plus@gmail.com](mailto:ruslan80plus@gmail.com), [kv1989@yandex.ru](mailto:kv1989@yandex.ru), [nyorlova@mephi.ru](mailto:nyorlova@mephi.ru)

Abstract. The manufacture of parts using additive technologies makes it possible to significantly complicate the spatial geometry of an individual part / node, and in general simplify the mechanism while maintaining operational properties. This paper presents an example of topological optimization of a node consisting of 3 main parts and 27 fasteners. The optimized design has 2 main parts and 12 fasteners. The production time of only the main parts was reduced by 36%.

*Key words:* topological optimization, SLM technology, 3D printing, additive manufacturing.

Оснащение производства современной техникой и передовыми технологиями, дающими возможность повышения технологичности, уменьшения массы и получения новых, ранее не возможных в изготовлении, изделий является важной задачей современного машиностроения.

Внедрение в производство аддитивных технологий позволяет изменить представление о проектировании и изготовлении деталей/узлов. В отличие от традиционной технологии изготовления, где лишний материал удаляется резанием, что повышает трудоёмкость изготовления, при аддитивном изготовлении, чем меньше материала, тем меньше время изготовления.

Проектирование и/или модернизация изделий для максимального использования возможностей изготовления по технологии SLM это принципиально новый подход. Для этого необходимо использовать CAD, CAM, CAE системы.

Основные детали исходного узла представлены на рисунке 1 (а,б,в). В исходной сборке – 30 деталей. Время изготовления основных деталей – 68 часов.



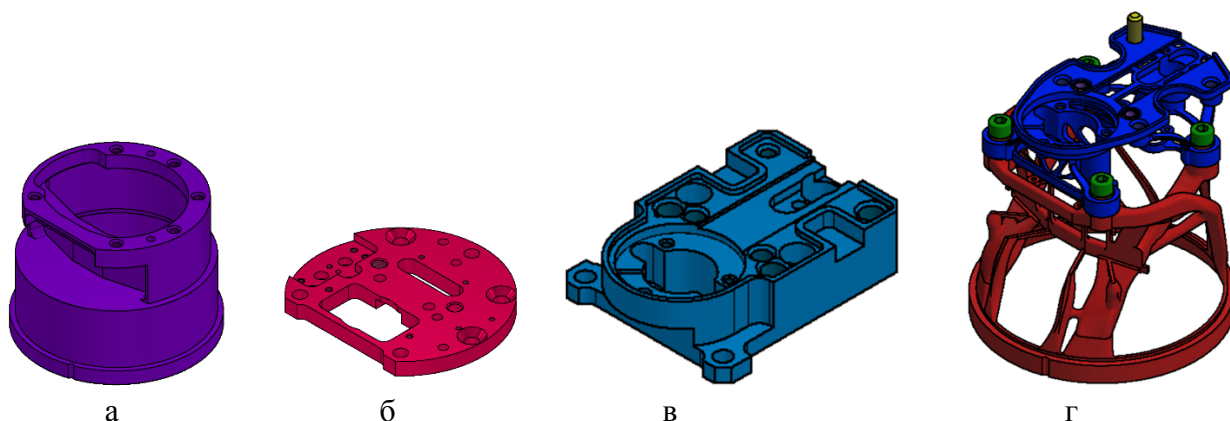


Рисунок 1 – Основные детали исходного узла (а,б,в) и оптимизированная конструкция (г).

После оптимизации (рисунок 1г) общее количество деталей узла уменьшилось до 14, а время изготовления уменьшилось на 36%, уменьшилась масса и объём деталей, при сохранении эксплуатационных свойств. Кроме того, за счёт уменьшения объёма, занимаемого деталями возможна дальнейшая модернизация всего изделия с повышением его компактности.

Для достижения результатов были выполнены следующие задачи:

1. проанализирована исходная пространственная геометрия узла и технологический процесс изготовления;
2. выполнено моделирование нагрузок;
3. рассмотрены варианты модернизации конструкции;
4. выполнены прочностные расчёты;
5. Проведена практическая апробация изготовления по технологии SLM.

Таким образом, применение аддитивных технологий открывает перспективы изготавливать изделия со сложной геометрией, которые невозможно изготовить традиционными методами резания материалов. Повышение технологичности, уменьшение массы, повышение компактности, эксплуатационных свойств, а также эффективности производственного процесса изготовления, повышение универсальности оборудования, т.е. гибкости производства, т.к. в качестве исходного материала используется металл-порошковая композиция вне зависимости от формы готового изделия.

*Использованные источники:*

1. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. – Санкт - Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
2. Гибсон Я. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер; пер. с англ. И. В. Шишковского. - Москва: Техносфера, 2016. - 646 с.
3. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – Москва: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.

## ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПЛУТОНИЯ В МОКС-ТОПЛИВЕ ПО ШЛИФУ ТАБЛЕТКИ

Карзанов Ю.А., Мальцев А.А.  
ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская обл.  
[mayak@po-mayak.ru](mailto:mayak@po-mayak.ru)

В период с 2018 года по 2022 на опытной установке, расположенной на ФГУП «ПО «Маяк» велось изготовление образцов таблеток смешанного оксидного уран-плутониевого топлива (далее - МОКС-топливо), в соответствии с ТУ, разработанным в ОАО «ВНИИНМ», используемые в дальнейшем при загрузке активной зоны Белоярской АЭС.

В следствие отсутствия методик и рекомендаций по контролю отдельных параметров таблеток таких, как: максимальный линейный размер участка с повышенным содержанием плутония от номинального значения (массовой доли плутония к сумме изотопов урана и плутония) в два раза, площадь участков с повышенным содержанием плутония от номинального значения в два раза от площади сечения шлифа, специалистами ФГУП «ПО «Маяк» была разработана методика по контролю данных параметров с использованием сканирующего электронного микроскопа (далее - СЭМ) и энергодисперсионной приставки.

Суть метода заключалась в картировании поверхности подготовленного шлифа таблетки МОКС-топлива с использованием ЭДС-детектора и дальнейшем анализе полученных данных при помощи программного обеспечения, встроенного в СЭМ.

Методика была валидирована сотрудниками ОАО «ВНИИНМ» и использовалась для контроля МОКС-топлива, поступающего в дальнейшем на Белоярскую АЭС в период с 2018 по 2022 год, а также для проверки ее применимости в части контроля экспериментальных таблеток с измененными физическими характеристиками.

На основе полученного опыта были сделаны выводы по возможности применения методики не только к таблеткам известного состава, но и к экспериментальным, с измененными характеристиками, а также запланированы работы по усовершенствованию подходов к реализации разработанного метода контроля топливных композиций различного состава.



## **ЦИФРОВИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Каримов Р.А., Каримов В.А.

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[ruslan80plus@gmail.com](mailto:ruslan80plus@gmail.com)*

Аннотация: за последние десятилетия беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят огромное применение в жизни человека. Главным узлом в конструкции БПЛА является двигатель. Наблюдается слабая тенденция в развитии двигателей внутреннего сгорания для данного типа летательных аппаратов. Данная работа посвящена вопросам проработки, оцифровки конструкторской документации двигателя и адаптации для применения его в БПЛА.

*Ключевые слова: Двигатель внутреннего сгорания, беспилотные летательные аппараты, системы автоматизированного проектирования, цифровые технологии*

## **DIGITIZATION OF DESIGN DOCUMENTATION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Karimov R.A., Karimov V. A.

*FGAOU VO "Snezhinsk Institute of Physics and Technology of National Research Nuclear  
University MEPhI", Chelyabinsk Oblast, Russia.  
[ruslan80plus@gmail.com](mailto:ruslan80plus@gmail.com)*

Abstract: over the past decades, unmanned aerial vehicles (UAVs) have found tremendous applications in human life. The main unit in the design of UAV is the engine. There is a weak trend in the development of internal combustion engines for this type of aircraft. This paper is devoted to the issues of development, digitization of engine design documentation and adaptation for its application in UAVs.

*Keywords: Internal combustion engine, unmanned aerial vehicles, computer-aided design systems, digital technologies*

За последнее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более востребованными в различных областях, таких как гражданская авиация, военная техника, транспорт, мониторинг окружающей среды и многих других. Главным узлом в летательных аппаратах является двигатель. На отечественные БПЛА устанавливаются в основном зарубежные двигатели внутреннего сгорания. Актуальным на сегодняшний день является разработка двухтактного двигателя, адаптация его к современным БПЛА и перенос соответствующей конструкторской документации в цифровую форму. Это способствует ускорению развития отечественных двигателей для БПЛА. В России практически отсутствует тенденция развития двигателей внутреннего сгорания, используемых в БПЛА. В связи с бурным развитием беспилотных летательных аппаратов, наблюдается проблема в адаптации и подготовке конструкторской документации (КД) двухтактного двигателя.

Цель работы: подготовка и адаптация конструкторской документации двухтактного двигателя внутреннего сгорания для применения его в БПЛА.

Задачи:

1. Ознакомиться с существующими разработками двигателей для сверхлегкой авиации (СЛА) и БПЛА
2. Осуществить перенос конструкторской документации двухтактного двигателя в системы автоматизированного проектирования (САПР).
3. Произвести разработку более компактного двигателя, адаптированного для современных БПЛА.
4. Провести расчеты адаптированного двигателя.
5. Подготовить бюджет проекта.

*Использованные источники:*

1. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев // В 3-х томах. – 6-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Машиностроение, 1982. – 296 с.
2. Замятин, С.В. Беспилотные летательные аппараты / С.В. Замятин, М.И. Пушкарев, Е.М. Яковлева // Томск: ТПУ, 2016. — 100 с.
3. Моисеев, В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В.С. Моисеев // Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. - 768 с.

## РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ УДАРЕ

Степанов И.Ю.<sup>1,2</sup>, Коробейников К.А.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им.академ.Е.И.Забабахина», Снежинск, челябинская обл.  
[konstkor62.1962@mail.ru](mailto:konstkor62.1962@mail.ru)

В работе численным методом конечных элементов определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) защитного приспособления легкового автомобиля при ударе со скоростью 10 км/ч.

*Ключевые слова:* удар, защитное приспособление, напряженно-деформированное состояние

## CALCULATION OF THE PROTECTIVE DEVICE OF THE CAR IN CASE OF IMPACT

Stepanov I.Y.<sup>1,2</sup>, Korobeynikov K.A.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Snezhinsk Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPHI, Chelyabinsk region.

<sup>2</sup>FSUE RFNC-VNIITF named after Acad. E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region.  
[konstkor62.1962@mail.ru](mailto:konstkor62.1962@mail.ru)

The numerical finite element method is used to determine the stress-strain state (VAT) of the protective device of a passenger car upon impact at a speed of 10 km/h.

*Keywords:* impact, protective device, stress-strain state

Данная работа является продолжением предыдущей работы /1/ по оценке поведения защитного устройства легкового автомобиля при ударах с небольшими скоростями порядка 10 км/ч. Как показали результаты предварительных расчетов вариант защиты, (схематично показанный на рис.1) в целом обеспечивает как снижение ударных нагрузок (степень перегрузки), так и целостность кузова автомобиля при лобовом столкновении.

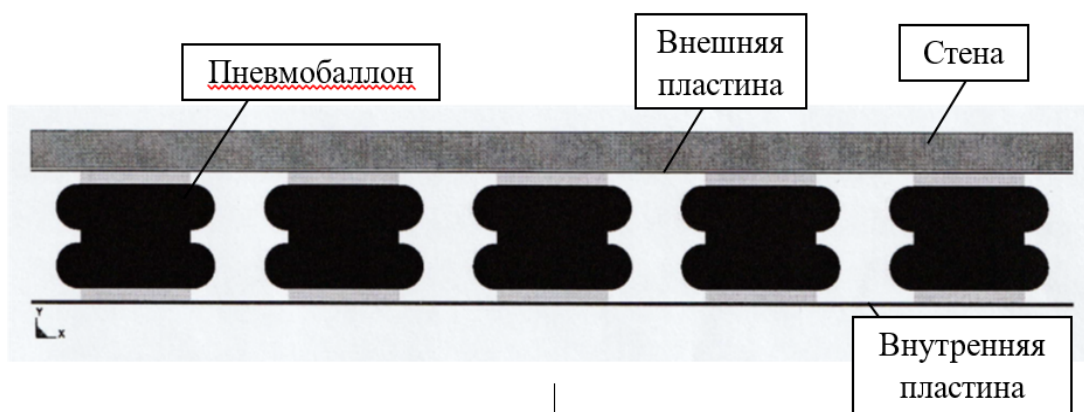


Рисунок 1- Расчетная схема защитного приспособления

В первоначальном варианте расчета МКЭ /1/ пневмобаллон рассматривался приближенно, как монолитная упругая модель, выполненная из резины с заданными упругими характеристиками. Сравнение полученных данных с результатами аналитических расчетов

показали их неплохую сходимость. Однако открытыми остались вопросы, связанные с напряженно-деформированным состоянием баллонов при заданной скорости удара (10 км/ч).

С этой целью был рассмотрен вариант модели максимально приближенный к реальному пневмобаллону, что позволило перейти на более высокий с точки зрения точности и информативности уровень расчета МКЭ. На внутренние стенки пневмобаллона действует давление равное 0,8 МПа. Препятствие (стена) жестко закреплено по оси Y. Расчетное время 10 мс.

Результаты расчета приведены на рисунках 2 – 5.

На рисунке 2 изображено распределение напряжений в демпфирующем устройстве на момент времени 3 м/секунды после удара о преграду. Максимальные напряжения достигаются во внешней пластине и составляют 43,48 МПа.

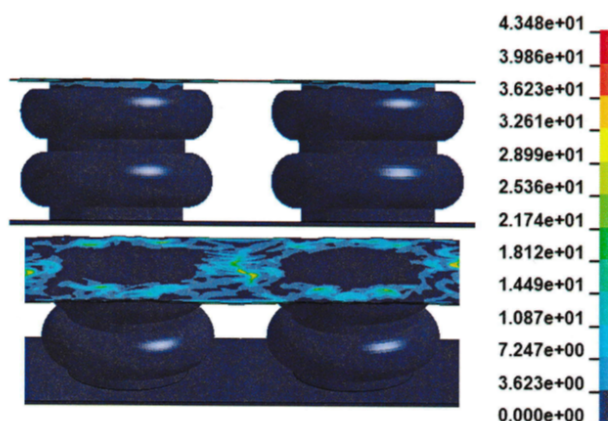


Рисунок 2 – Распределение напряжения в защите, МПа

На рисунке 3 изображено распределение напряжений в пневмобаллоне на момент времени 3 м/секунды после удара о преграду. Максимальные напряжения составляют 6,876 МПа.

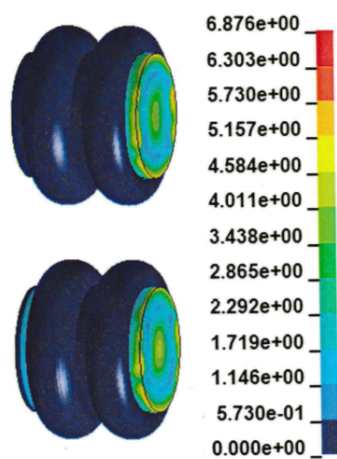


Рисунок 3 – Распределение напряжения в пневмобаллонах, МПа

На рисунке 4 изображен график зависимости деформаций от времени. Максимальная деформация упругих элементов демпфирующего устройства составила 25 мм.

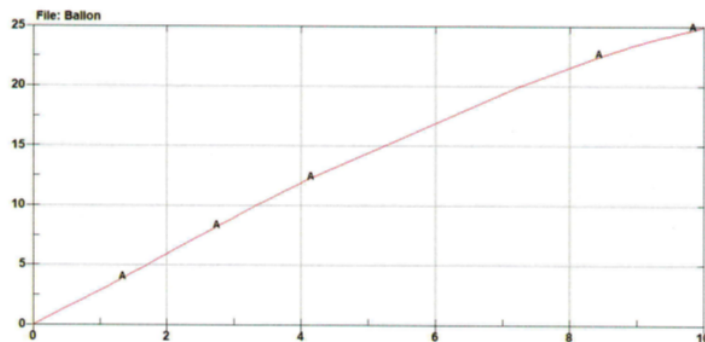


Рисунок 4 – График зависимости деформаций от времени

На рисунке 5 изображен график зависимости скорости от времени. Максимальная скорость отскока составила 3,4 м/с, а среднее ускорение  $-118 \text{ м/с}^2$ .

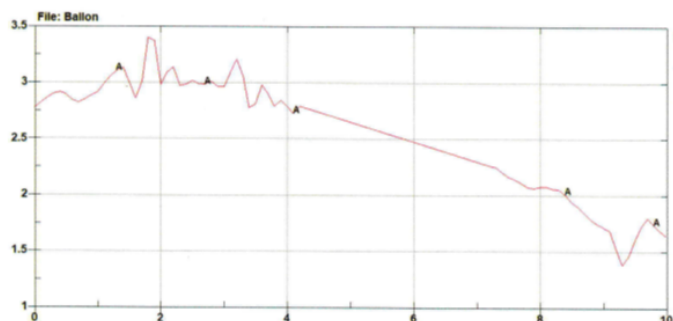


Рисунок 5 – График зависимости скорости от времени

Выводы:

1. Максимальная деформация упругих элементов бампера в конце удара составила 0,025 м. Максимальные напряжения в демпфирующем устройстве достигаются во внешней пластине и составляют 43,48 МПа. Максимальные напряжения в пневмобаллоне составляют 6,876 МПа. Это позволяет говорить об упругом поведении защиты при ударе.
2. В дальнейшем необходимо:
  - произвести оценку поведения защиты при косом ударе и сосредоточенном (местном) ударе, а также при ударе со скоростями порядка 20 - 30 км/ч;
  - определить предельные значения скоростей при которых произойдет разрушение баллона;
  - уточнить модели упругого элемента, приближенной к пневмобаллону без дополнительного объема (ресивера) и с ресивером;

#### Список использованных источников

1. Коробейников К.А. Динамическая модель защиты при ударе. Снежинск и наука – 2009. Современные проблемы атомной науки и техники: Сб. науч. тр. МНПК, - Снежинск: Изд-во СГФТА, 2009.С. 50-52.
2. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики, А. О. Шимановский, А. В. Путьято. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 61 с.

## СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКА Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГОМОГЕННОГО СОСАЖДЕНИЯ

Колесова Т.В., Титова О.В., Юрченко О.С., Василенко Н.В., Сериков А.С., Лысенко О.В.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[bvn@vniitf.ru](mailto:bvn@vniitf.ru)

В работе проведены исследования по синтезу порошка оксида иттрия, допированного ионами Nd<sup>3+</sup> (1 ат.%), методом гомогенного соосаждения с последующей термообработкой прекурсора.

Выбраны оптимальные условия соосаждения для получения неагломерированных сферических частиц порошка прекурсора, а также температурно-временной режим термообработки прекурсора для получения монофазного порошка Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Определены фазовый состав, удельная поверхность, форма и размер частиц порошка Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, проведён химический анализ порошка на содержание примесей.

*Ключевые слова: порошок Nd: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, метод гомогенного соосаждения, карбамид, сферические частицы, размер частиц)*

## SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> POWDERS BY HOMOGENEOUS CO-PRECIPIATION METHOD

Kolesova T.V., Titova O.V., Yurchenko O.S., Vasilenko N.V., Serikov A.S., Lysenko O.V.  
FSUE "RFNC - ARITP named after academician Ye.I. Zababakhin", Snezhinsk, Chelyabinsk region  
[bvn@vniitf.ru](mailto:bvn@vniitf.ru)

The work carried out studies on the synthesis of yttrium oxide powder doped with Nd<sup>3+</sup> ions (1 at.%) by homogeneous co-precipitation followed by heat treatment of the precursor.

Optimal co-precipitation conditions were selected for the production of non-agglomerated spherical particles of precursor powder, and also the temperature-time conditions of precursor heat treatment for the production of monophasic Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder. The phase composition, specific surface area, shape and particle size of Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder were determined, and a chemical analysis of powder for the content of impurities was carried out.

*Key words: Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder, homogeneous co-precipitation, urea, spherical particles, particles size)*

Для изготовления методом твердофазного синтеза лазерной иттрий-алюминиевой керамики с высоким коэффициентом пропускания актуальной задачей является разработка способов получения неагломерированных монодисперсных нанопорошков оксида иттрия, допированного ионами Nd<sup>3+</sup>, преимущественно сферической формы [1, 2]. Перспективным способом получения таких порошков является метод гомогенного соосаждения с использованием карбамида в качестве осадителя [3-6].

### Синтез порошка Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом гомогенного соосаждения

В качестве исходных материалов для получения порошка Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> использовали Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> марки ИтО-В (99,9993 %, ТУ 48-4-524-90) и Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99,99 %, SIGMA – ALDRICH). В качестве осадителя использовали карбамид ((NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO) марки «чда» (ГОСТ 6691-77).

Для получения сферических нанопорошков Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Nd<sup>3+</sup> (1 ат.%) применяли метод гомогенного соосаждения из водных растворов нитратов иттрия и неодима [2, 4-6]. Растворы нитратов готовили растворением оксидов иттрия и неодима в азотной кислоте («осч 18-4», ГОСТ 11125-84) при нагревании и перемешивании. Концентрацию ионов Y<sup>3+</sup> в маточном растворе варьировали в интервале 0,01-0,02 моль/л. Карбамид растворяли в



дистиллированной воде при помощи магнитной мешалки без нагрева, его концентрация в маточном растворе варьировалась в интервале 0,5-2 моль/л. Маточный раствор, состоящий из смеси водных растворов нитратов иттрия и неодима и раствора карбамида, нагревали в стеклянном стакане до температуры  $\sim 90^\circ\text{C}$  при постоянном перемешивании и после начала выпадения осадка выдерживали при  $90-100^\circ\text{C}$  в течение 1-3 часов. После выдержки охлажденный раствор с осадком фильтровали при помощи вакуум-фильтра. Осадок на фильтре промывали 3-4 раза дистиллированной водой и 1 раз – этиловым спиртом, затем сушили при  $80^\circ\text{C}$  в течение не менее 6 часов. Полученный порошок прекурсора прокаливали при температуре  $700^\circ\text{C}$  в течение 2 часов.

Выбор оптимальных условий соосаждения и режима термообработки прекурсора

В результате исследования влияния концентраций  $\text{Y}^{3+}$ ,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  и соотношения  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+})$  в маточном растворе на агломерацию и размер частиц порошков прекурсоров выявлено, что с увеличением концентрации  $\text{Y}^{3+}$  при постоянной концентрации карбамида в маточном растворе, т.е. с уменьшением соотношения  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+})$ , частицы прекурсора становятся менее сферическими, более крупными и сильнее срастаются в агломераты (рис. 1).

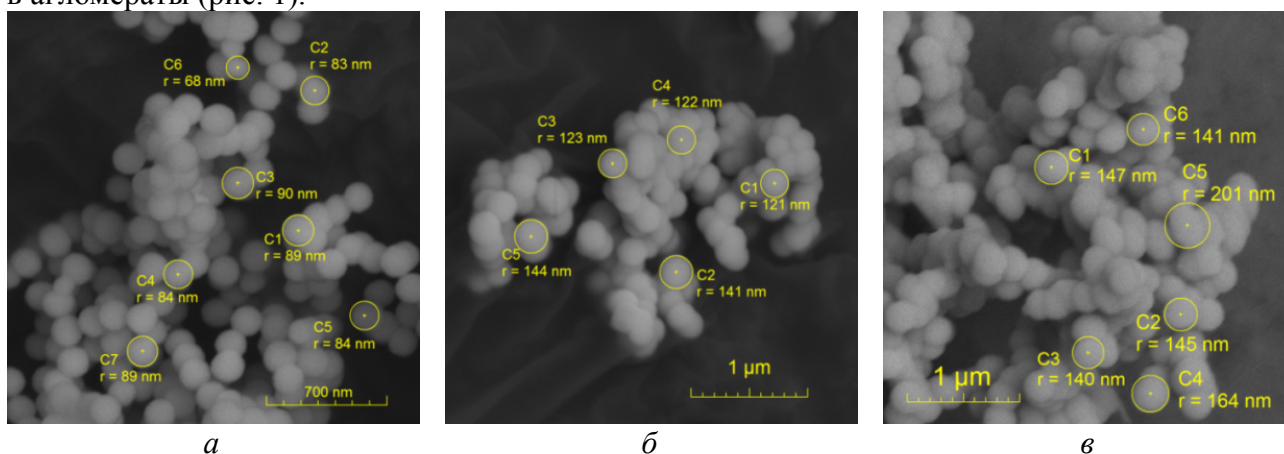


Рис. 1 – Электронные снимки порошков прекурсоров, полученных при  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO}) = 0,5$  моль/л с изотермической выдержкой осадка при  $\sim 98^\circ\text{C}$  в течение 1 часа:

а –  $\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 0,01$  моль/л,  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 50$ ; б –  $\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 0,015$  моль/л,  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 33, (3)$ ; в –  $\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 0,02$  моль/л,  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 25$

При этом увеличение концентрации карбамида при  $\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 0,02$  моль/л до соотношения  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 50$  не снижает агломерацию порошка прекурсора. При дальнейшем увеличении соотношения  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+})$  до 100 агломерация порошка уменьшается, но частицы уже не имеют правильной сферической формы.

При  $\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 0,01$  моль/л,  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO}) = 0,5$  моль/л и соотношении  $\text{C}((\text{NH}_2)_2\text{CO})/\text{C}(\text{Y}^{3+}) = 50$  были получены практически монодисперсные неагломерированные сферические частицы прекурсора, поэтому данные концентрации компонентов в маточном растворе были выбраны как оптимальные.

Увеличение времени выдержки осадка от 1 до 3 часов и увеличение температуры изотермической выдержки с  $90$  до  $100^\circ\text{C}$  не оказывают влияние на форму, размер и выход порошка прекурсора.

Определение термических эффектов разложения прекурсора и температуры синтеза  $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$  проводили при помощи совмещенного термического анализа путём нагревания образца в азотной среде до  $1000^\circ\text{C}$  со скоростью  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ . С учётом полученных результатов был выбран температурно-временной режим, позволяющий получать монофазный порошок  $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$ : нагрев до  $700^\circ\text{C}$  со скоростью  $350^\circ\text{C}/\text{час}$ ; изотермическая выдержка при  $700^\circ\text{C}$  в течение 2 часов.

Физико-химические характеристики и морфология порошка  $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$

Морфологию частиц порошков прекурсора и  $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$  изучали по снимкам с электронного микроскопа. Рентгенограмма получена на дифрактометре на излучении  $\text{CuK}\alpha$  в

диапазоне углов  $2\theta$  с 16 до 95 градусов. Удельную поверхность определяли методом низкотемпературной адсорбции. Химический анализ порошка на содержание загрязняющих примесей проводили с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа.

На рис. 2 представлены снимки частиц порошков прекурсора и  $Y_2O_3:Nd^{3+}$  (1 ат.%), полученных из маточного раствора с  $C(Y^{3+}) = 0,01$  моль/л и  $C((NH_2)_2CO) = 0,5$  моль/л при выдержке осадка при 96-98°C в течение 1 часа.

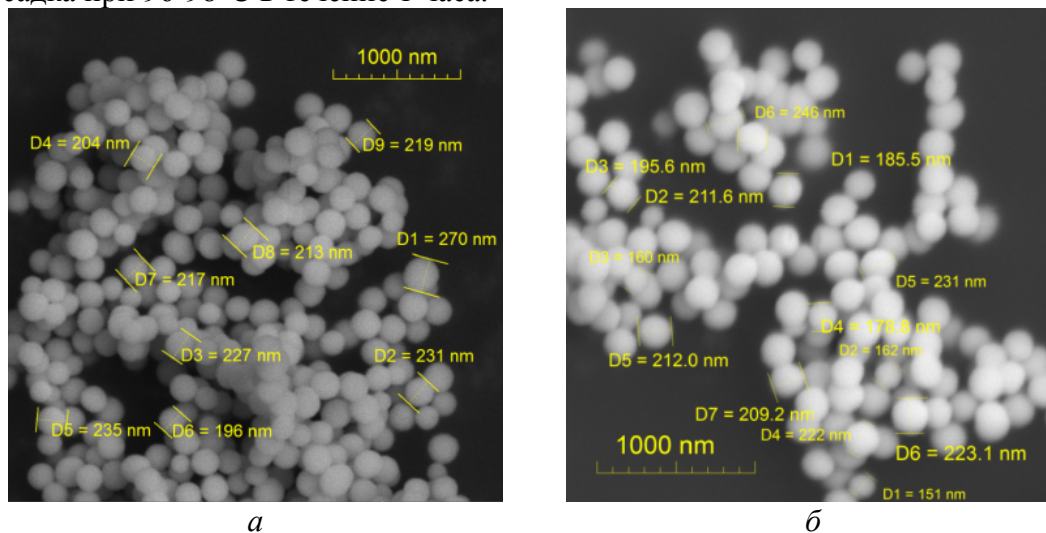


Рис. 2 – Электронные снимки частиц порошков прекурсора (а) и  $Nd:Y_2O_3$  (б)

Из рис. 2 видно, что порошки прекурсора и  $Nd:Y_2O_3$  представляют собой практически монодисперсные неагломерированные сферические частицы. Размер частиц порошка прекурсора – 196÷270 нм, после термообработки прекурсора размер частиц порошка уменьшается.

Физико-химические характеристики и морфология порошка  $Y_2O_3:Nd^{3+}$  (1 ат.%) представлены в табл. 1.

Характеристика	Значение
Фазовый состав	$Y_2O_3$ кубической сингонии (карточка №01-082-2415) с параметром решетки $a = 1,062$ нм
Форма частиц	сферическая
Размер частиц, $d$ , нм	151÷246
Средний размер частиц, $d_{ср}$ , нм	~200
Удельная поверхность, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	$8,32 \pm 0,15$
Суммарное содержание примесей, %	не более 0,025

Табл. 1 – Физико-химические характеристики и морфология порошка  $Nd:Y_2O_3$

*Использованные источники:*

- Багаев С.Н., Каминский А.А., Копылов Ю.Л. и др. Получение нанопорошков  $Re_2O_3$  ( $Re = Y, La, Yb, Nd$ ) со сферическими частицами и лазерных керамик на их основе // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 3. С. 271–275.
- Вассерман И.М. Химическое осаждение из растворов. Л.: Химия, 1980. - 208 с.
- Иванов М.Г., Копылов Ю.Л., Кравченко В.Б. и др. Лазерная керамика ИАГ И  $Y_2O_3$  из неагломерированных наноразмерных порошков // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 9. С. 1028–1036.
- Sohn S., Kwon Y., Kim Y., Kim D. Synthesis and characterization of near-monodisperse yttria particles by homogeneous precipitation method // Powder Technology. 2004. № 142. P. 136–153.
- Huang Y., Jiang D., Zhang J., et al. Synthesis of mono-dispersed spherical  $Nd:Y_2O_3$  powder for transparent ceramics // Ceramics International. 2011. № 37. P. 3523–3529.
- Sordelet D., Akinc M.. Preparation of spherical, monosized  $Y_2O_3$  precursor particles // Journal of Colloid and Interface Science. 1988. V. 122. № 1. P. 47–59.



## ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ КАПРОЛОНА

Кушнир П.О.<sup>1,2</sup>, Шульгин А.Н.<sup>1</sup>, Кушнир О.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск.

[kushnir\\_p@mail.ru](mailto:kushnir_p@mail.ru)

## THE MAIN FACTORS INFLUENCING THE QUALITY OF TURNING CAPROLON

Kushnir P.O.<sup>1,2</sup>, Shulgin A.N.<sup>1</sup>, Kushnir O.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University  
MEPhI, Chelyabinsk Region

<sup>2</sup>FGUP RFYATS-VNIITF named after Academician E.I. Zababakhina, Snezhinsk

Капролон (полиамид-6 блочный, ПА 6 блочный) - конструкционный полимер, обладающий хорошими антифрикционными свойствами и являющийся диэлектриком. Материал износостойкий, отлично работает в парах трения. Обладает высоким усталостным сопротивлением.<sup>1</sup> Капролон широко используется в машиностроении, судостроении в качестве материала для подшипников, шестерен, втулок, валов, роликов и т.п.

Капролон легче стали более чем в 6 раз, поэтому его применение значительно облегчает конструкции. Изделия из капролона заменяют бронзу, латунь, баббит. Капролон удачно сочетает высокую механическую прочность с эластичностью в широком температурном интервале. Изделия из капролона эрозионно устойчивы; отлично работают в горюче-смазочных жидкостях, в морской воде, в органических растворителях, в спиртах, щелочах и разбавленных кислотах. Компоненты из капролона характеризуются отличным сроком службы и оптимальной стоимостью.

### **Обработка точением:**

При обработке различных материалов, в том числе и полимерных, важно обеспечить высокое качество поверхности обработанных деталей. В частности, от качества поверхностного слоя зависят прочность детали при многократных нагрузках, износостойкость, коэффициент трения, коррозионная стойкость, оптические и химические свойства.

Допуски при токарной обработке для деталей из полимерных материалов обычно значительно шире, чем для металлических деталей. Это обусловлено большим коэффициентом теплового расширения и возможными деформациями, вызванными внутренними напряжениями во время и после токарной обработки.

Общие рекомендации по механической токарной обработке капролона (полиамида 6).<sup>5</sup>

Капролон обрабатывается всеми основными видами механической токарной обработки на металлорежущем оборудовании. Основными особенностями капролона, определяющими специфику обработки являются:

1. Низкие теплопроводность и температура плавления, вызывающие подплавление при повышенном трении инструмента.
2. Упругость материала, вызывающая изменение размеров, отверстий при обработке (сверление, зенкерование).

**Геометрические параметры резцов:**

Материал режущей части	Передний угол, °	Задний угол, °	Главный угол в плане, °	Вспомогательный угол, °	Радиус закругления вершины, мм
Быстрорежущая сталь	25	5	45	45	0.8-2

Геометрические параметры режущей части применяемого в токарной обработке проходного и расточного инструмента. Табл. 1

Материал режущей части	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Стойкость резца, мин.
Быстрорежущая сталь	250-350	0,1-0,75	1-10	120

Рекомендуемые режимы резания. Табл. 2

Шероховатость обработанной поверхности на операциях точения, резания и сверления зависит от скорости подачи и составляет Rz 80 при скорости подачи от 0,1 мм/об до 0,5 мм/об и глубине от 0,5 мм до 7 мм. При увеличении скорости подачи до 0,75 мм/об и глубины до 10 мм шероховатость уменьшается с Rz 80 до Rz 40.

**Сверление отверстий:**

Материал режущей части	Передний угол, °	Задний угол, °	Главный угол в плане, °	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об
Быстрорежущая сталь	3 - 5	10 - 15	90 - 120	50 - 100	0,1 - 0,3

Рекомендуемые режимы резания при сверлении капралона. Табл. 3

Для сверления заготовок капралона хорошо подходят спиральные сверла из быстрорежущей стали, но из-за большого тепловыделения необходимо применение воды или сжатый воздух. Для лучшего теплоотвода и отвода стружки, сверло необходимо регулярно вынимать из места сверления, особенно в случае глубоких отверстий. Для отверстий больших диаметров следует, прежде всего, уменьшить обычную толщину перемычки сверла для уменьшения теплоты трения. Также для отверстий большого диаметра рекомендовано работать последовательно, например, для сверления 50 мм: следует сверлить по очереди 12 и 25 мм. После этого диаметр необходимо увеличивать сверлами больших диаметров или с помощью плоского токарного резца. Во избежание трещин, для круглых заготовок диаметром более 100 мм при сверлении отверстий, не следует применять спиральные сверла из быстрорежущей стали. Вместо этого отверстия должны растачиваться с помощью плоского токарного резца, режущая кромка которого устанавливается точно в центр. При сверлении сквозных отверстий в конце процесса обработки подача должна быть уменьшена, чтобы предотвратить биение начальной стороны сверлом или плоским резцом, что могло бы вызвать кромоочное выламывание. По возможности следует всегда применять механические подачи, чтобы избежать прихватывание и разрушение пластмасс при неравномерной ручной подачи.

При сверлении точных отверстий диаметр сверла из-за усадки обрабатываемого материала должен быть на 0,1 мм больше, чем диаметр отверстия (для диаметров от 10 до 30 мм). Для предотвращения разбивки отверстия на входе и конусности, биение сверл, установленных в шпиндель станка, не должно превышать 0,05мм. Сверление отверстий диаметром 5-30 мм проводить со скоростями резания 50 м/мин -100 м/мин и подаче 0,1 мм/об

- 0,30 мм/об. Большие скорости резания и подачи допустимы для больших размеров сверл. Стойкость сверл, в зависимости от диаметра, составляет 60 мин - 120 мин.

**Температурное влияние во время обработки:**

Максимальная температура процесса при обработке деталей из капролона не должна превышать 120-160 °С.<sup>4</sup> Образующаяся температура при обработки полимерных материалов отводится в основном через инструмент, стружку. Повышение производительности при обработке полимеров связано с необходимостью интенсивного охлаждения зоны резания и режущего инструмента при обеспечении высокого качества обработанной поверхности и точности размеров детали. Однако применение традиционных охлаждающих сред при обработке капролона весьма ограничено из-за повышенного влагопоглощения пластика в сочетании с изменением размеров детали и физико-механических свойств обрабатываемого материала. Так же для охлаждения режущего инструмента при обработке капролона можно использовать сжатый воздух. Учитывая плохую теплопроводность и сравнительно низкую (по сравнению с металлом) температуру плавления капролона, необходимо уменьшать тепловыделение в процессе обработки. Избыточное тепло может привести к нежелательным последствиям: деформации или разрыву заготовки, образование наклепа/наплавления на режущий инструмент.

Доказано, что изменение механических свойств капролона в процессе охлаждения значительно улучшает обрабатываемость, даже для многолезвийных инструментов. Этим мы получаем качественно обрабатываемую поверхность.

**Заключение:**

При соблюдении общепринятых рекомендаций, не даёт 100% результата качества обработки. Требования нормативных документов на токарную обработку и сам материал и рекомендуемые режимы резания, приведенные в справочных материалах, значительно отличаются друг от друга, предметная область изучена не полностью. Однако на практике режимы резания назначаются самостоятельно.

*Список использованных источников:*

1. Антропова Н. И. и др. Капролон, его свойства, получение и применение. Л.: ЛД НТП, 1966. - 120 с.
2. Богданов В. М. Исследование процесса резания пластмасс: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Томск, 1967. 16 с.
3. Режимы резания и геометрия инструмента для обработки пластмасс, применяемых в станкостроении. / Под ред. П. П. Грудова. М.: ЦБТИ, 1956. -48 с.
4. Амосов И. С., Скраган В. А. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке. Л.: - М.: МАТТТИЗ, 1953. - 70 с.
5. ГОСТ 3266-81 Метчики машинные и ручные конструкция и размеры. Дата введения 1982-07-01. Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 1981-01-29. N 328 срок введения установлен с 01.07.82 взамен ГОСТ 3266-71. ИЗДАНИЕ (февраль 2003 г.) с Изменением N 1, принятым в январе 1999 г.

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ТУРБОКОМПРЕССОРА МЕТОДОМ РЕВЕРСИВНОГО ИНЖИНИРИНГА

Мирошкин З.К., Ежов Р.А., Орлова Н.Ю., Пильщиков А.А., Гусев А.И.  
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,  
Снежинск, Челябинская обл.

В связи секционной политикой и наличием на территории России большого количества импортного оборудования остро встаёт вопрос изготовления вышедших из строя деталей и узлов. Для ускорения процесса их изготовления можно использовать реверсивный инжиниринг. В данной работе разработан алгоритм реверсивного инжиниринга и выполнена апробация на примере проектирования турбокомпрессора.

*Ключевые слова: реверсивный инжиниринг, 3Д – сканер, конструкторская документация, расчёт.*

## DEVELOPMENT OF DESIGN DOCUMENTATION FOR A TURBOCHARGER BY REVERSE ENGINEERING

Miroshkin Z.K., Ezhov R.A., Orlova N.Yu., Pilshchikov A.A., Gusev A.I.  
Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University  
MEPhI, Chelyabinsk region.  
FSUE "RFNC-VNIITF named after. academic E.I. Zababakhin",  
Snezhinsk, Chelyabinsk region.

Due to the sectional policy and the presence of a large number of imported equipment in Russia, the issue of manufacturing defective parts and assemblies is acute. Reverse engineering can be used to speed up the manufacturing process. In this paper, a reverse engineering algorithm has been developed and tested using the example of turbocharger design.

*Keywords: reverse engineering, 3D scanner, design documentation, calculation.*

В настоящее время из-за нарастающего санкционного давления остро стоит проблема в невозможности закупать импортные комплектующие для различных видов техники. Поэтому активное развитие должен получить “реверсивный инжиниринг”. В отличие от традиционной технологии проектирования и изготовления копий деталей, осуществляемых традиционно с помощью универсальных мерительных инструментов, современные технологии реверсивного инжиниринга опирается на получение размеров и пространственной геометрии деталей с помощью приборов, позволяющих оцифровать объект. Повторение пространственной геометрии деталей узла часто не обеспечивает эксплуатационных характеристик копии в соответствующих оригиналу. В данной работе разработан алгоритм (рисунок 1) выполнение которого обеспечит не только соответствие пространственной геометрии копии оригиналу, но и сохранение эксплуатационных характеристик.

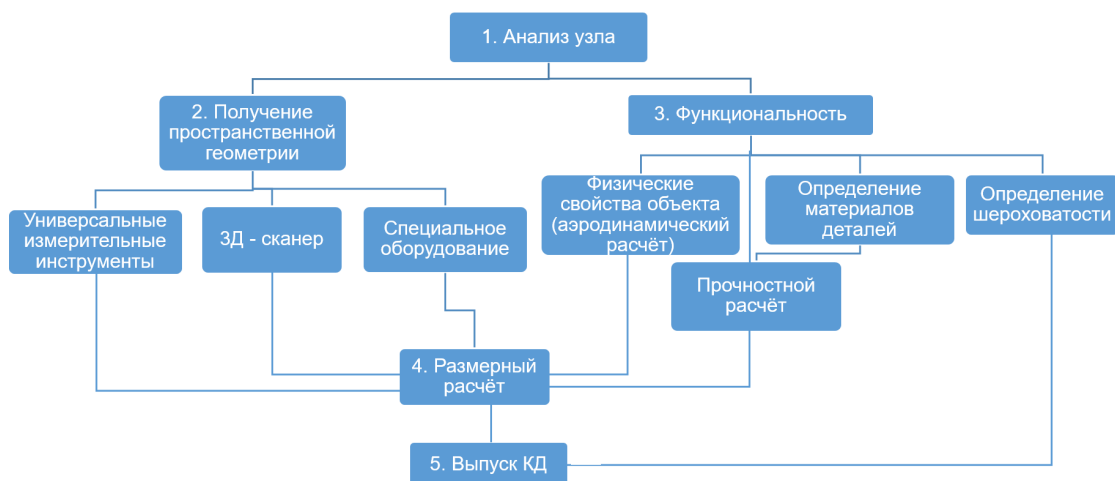


Рисунок 1 – Алгоритм реверсивного инжиниринга

Верификация разработанного алгоритма была выполнена на примере реверсивного инжиниринга турбокомпрессора, который имеет ряд деталей, имеющих сложную пространственную геометрию (рисунок 2).

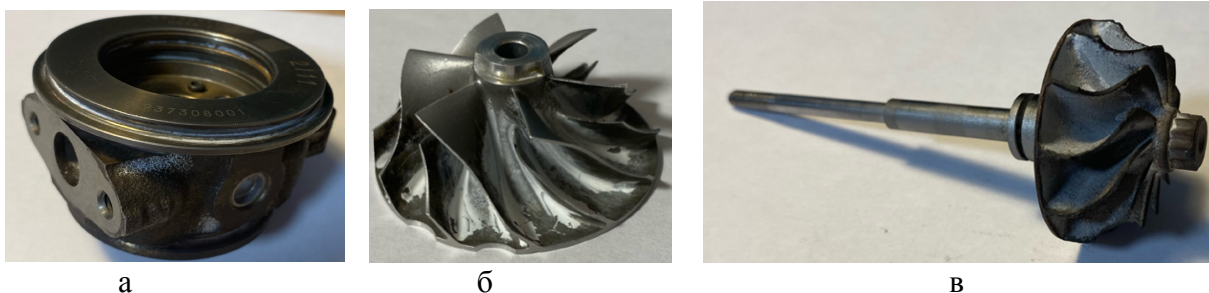


Рисунок 2 – Исходные детали турбокомпрессора: а – корпус, б – колесо, в -вал

Для получения цифровой модели наружных поверхностей использовался 3D сканер оптический со структурированной подсветкой

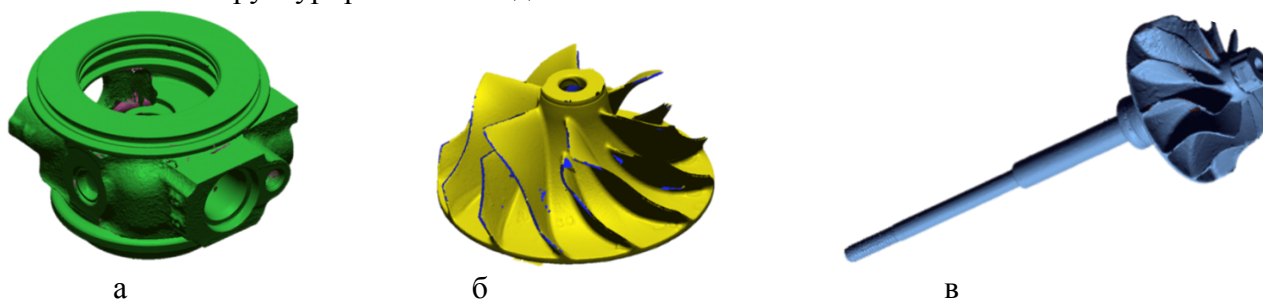


Рисунок 3 – Сканы деталей турбокомпрессора: а – корпус, б – колесо, в -вал

После определения пространственной геометрии и обработки сканов, делается анализ исходных материалов деталей, а также выполняются необходимые расчёты, в данном случае аэродинамические, на основании которых уточняется пространственная геометрия деталей. На основании полученных 3D моделей можно произвести изготовление этих деталей сложной пространственной геометрии по технологии селективного лазерного плавления в кратчайшие сроки.

Для выполнения реверсивного инжиниринга используются: программное обеспечение для обработки и моделирования геометрии с 3Д – сканов; система автоматизированного проектирования (далее – САПР); “слайсер”, ПО для генерации поддерживающих структур.

Как показал эксперимент разработанный алгоритм реверсивного инжиниринга позволяет получить работоспособный узел в наиболее короткие сроки.

*Использованные источники:*

- 1 Аль-Хафаджи С. Х. “Подход к производству продукции на основе технологии обратного инжиниринга: модели САПР с 3Д - сканера” LAP LAMBERT: Academic Publishing, 2021. – 128 с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора – машиностроителя: В 3 томах. Т.1. 8 – издание, переработанное и дополненное. Под ред. И.Н. Жестковой – Москва: Машиностроение, 2001. – 920 с.: ил.
3. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. “Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство” Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
4. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении/ М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – Москва: ГНЦ РФ ФГУП “НАМИ”, 2015. – 220 с.
5. Марочник сталей и сплавов. 2–е изд., доп и испр. / А. С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко – Москва: Машиностроение, 2003. - 784с.: ил.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для втузов– 9-е издание, переработанное. – Москва: Наука. Гл. ред. физ. –мат. Лит, 1986. – 512 с.
7. Способы оцифровки поверхности. URL: <https://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=202966>
8. 3Д-сканер со структурированным подсветом. URL: <https://foliplast.ru/product/3d-skanery/rangevision-spectrum/>
9. 3Д-сканер с лазерной триангуляцией. URL: [https://lider-3d.ru/catalog/3d\\_skanery/3d\\_skaner\\_creaform\\_handyscan\\_700/](https://lider-3d.ru/catalog/3d_skanery/3d_skaner_creaform_handyscan_700/)



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ SLM НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА.

Пильщиков А.А., Орлова Н.Ю., Ежов Р.А., Мирошкин З.К.  
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[aapilshchikov@mephi.ru](mailto:aapilshchikov@mephi.ru)

### Аннотация:

Рынок аддитивных технологий один из самых быстрорастущих рынков в России. Согласно данным из Стратегии развития аддитивных технологий, в период до 2030 года, рост рынка ожидается с 4 до 13 млрд. рублей [2].

Однако, при производстве деталей по технологии SLM остро встаёт вопрос оценки и улучшения показателей качества изделий, в частности точности геометрических размеров и шероховатости поверхности. При аддитивном производстве на данные параметры может оказывать влияние большое количество технологических факторов. Влияние каждого в отдельности фактора на точность геометрических параметров поверхностей не изучено, что может значительно замедлять внедрение этой технологии в реальный сектор экономики. Для активного внедрения аддитивных технологий в машиностроение требуется выявление влияющих технологических факторов и степени их влияния.

*Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, показатели качества, SLM-печать, шероховатость поверхности, точность размеров.*

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE LOCATION OF SAMPLES OBTAINED USING SIM TECHNOLOGY ON QUALITY INDICATORS.

Pilshchikov A.A., Orlova N.Yu., Yezhov R.A., Miroshkin Z.K.  
*Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University  
"MEPhI"*  
[aapilshchikov@mephi.ru](mailto:aapilshchikov@mephi.ru)

### Abstract:

The additive technology market is one of the fastest growing markets in Russia. According to the data from the Strategy for the Development of Additive Technologies, in the period up to 2030, the market is expected to grow from 4 to 13 billion rubles [2].

However, when manufacturing parts using SLM technology, the issue of evaluating and improving product quality indicators, in particular the accuracy of geometric dimensions and surface roughness, is acute. In additive manufacturing, these parameters can be influenced by a large number of technological factors. The influence of each individual factor on the accuracy of geometric parameters of surfaces has not been studied, which can significantly slow down the introduction of this technology into the real sector of the economy. For the active introduction of additive technologies into mechanical engineering, it is necessary to identify the influencing technological factors and the degree of their influence.

*Keywords: additive technologies, selective laser fusion, quality indicators, SLM printing, surface roughness, dimensional accuracy.*



**Целью работы** является определение влияния расположения образцов из никелевого сплава в рабочей камере SLM-принтера при печати на точность размеров и шероховатость поверхности.

Для этого решены следующие **задачи**:

- 1 Изготовлены образцы;
- 2 Проведены измерения размеров и шероховатости поверхности;
- 3 Проведён анализ измерений;
- 4 Разработаны рекомендации по расположению образцов в рабочей камере принтера для улучшения точности размеров и шероховатости поверхности.

#### **Изготовление образцов:**

Образцы изготовлены в СФТИ НИЯУ МИФИ на 3D-принтере Realizer SLM 100

Материал образцов – порошок ХН58МБЮ (ВЖ-159) ТТ 08-344-2017 производства АО «Полема» г. Тула, режимы печати, представлены в таблице 1, инертная среда – аргон.

Таблица 1 – Режимы печати.

Мощность лазера, Вт	180
Скорость сканирования, мм/с	1000
Высота слоя, мм	0,050
Диаметр пятна лазера, мм	0,040
Температура подогрева стола, °С	200

Изготовлены 4 партии по 30 штук. После изготовления на верхний торец образцов нанесена маркировка на лазерном гравере.

Схема расположения на подложке и маркировки образцов представлена на рисунке 1. Номинальный диаметр образцов 15 мм, высота 100 мм, высота поддержки 5 мм.

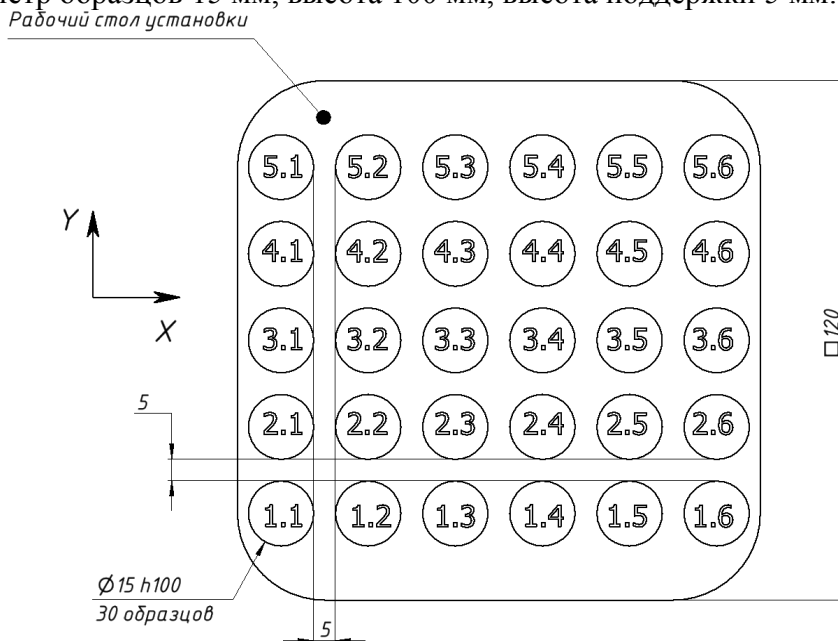


Рисунок 1 – Схема расположения образцов на подложке.

#### **Проведение измерений:**

Измерения диаметров образцов проводились микрометром HOLEX в 4 точках по высоте, в каждой из точек выполнялось по 3 измерения и находилось среднее значение. Измерения шероховатости поверхности проводились профилометром TR110 по параметру Ra аналогично измерению размеров.

### Анализ измерений:

Результаты измерений представлены в виде «боксплотов» на рисунке 2. Каждый график построен по результатам измерений образцов каждой позиции по четырём партиям и четырём высотам. Жёлтой линией на каждом графике указана медиана, зелёным треугольником среднее значение.

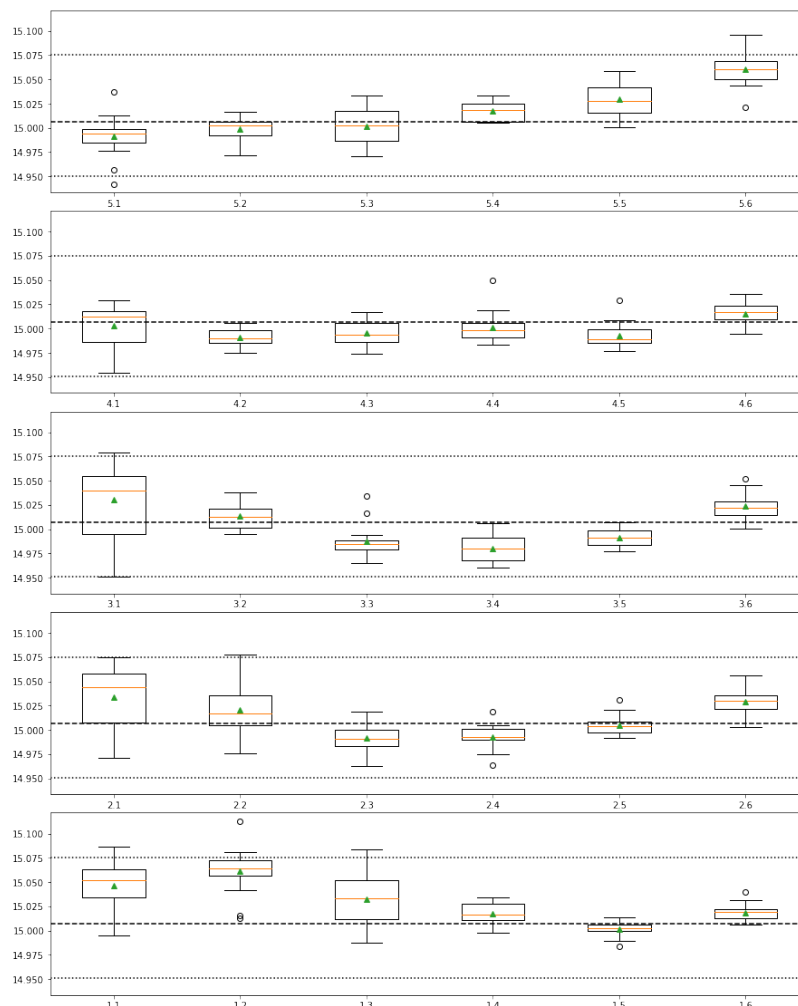


Рисунок 2 – Представление результатов измерений размеров в виде «боксплотов».

По результатам обработки измерений размеров образцов видно седлообразную форму графика, размеры в верхнем правом углу рабочей камеры и нижнем левом, как правило выше номинала, что возможно связано с нестабильностью формирования слоя порошка в этих местах. Размеры в центре рабочей платформы ниже номинала, как правило на 25 мкм, что может быть связано с лучшим прогревом центра платформы, так как в платформу установлен круглый нагреватель и после остывания образцы уменьшаются в диаметре. В пользу данной гипотезы говорит тот факт, что уменьшение диаметра при падении температуры на 180°С для данного сплава при остывании образца с рабочей температуры до комнатной примерно соответствует 25 мкм на диаметре 15 мм.

Так же видно, что в левой стороне платформы разброс значений размеров выше, это может быть связано с ослабеванием потока аргона, который обдувает сформированный слой (газовый шабер), что вносит нестабильность в процесс формирования слоя для сплавления.

Аналогичным образом обработаны результаты для измерений шероховатости (рисунок 3).

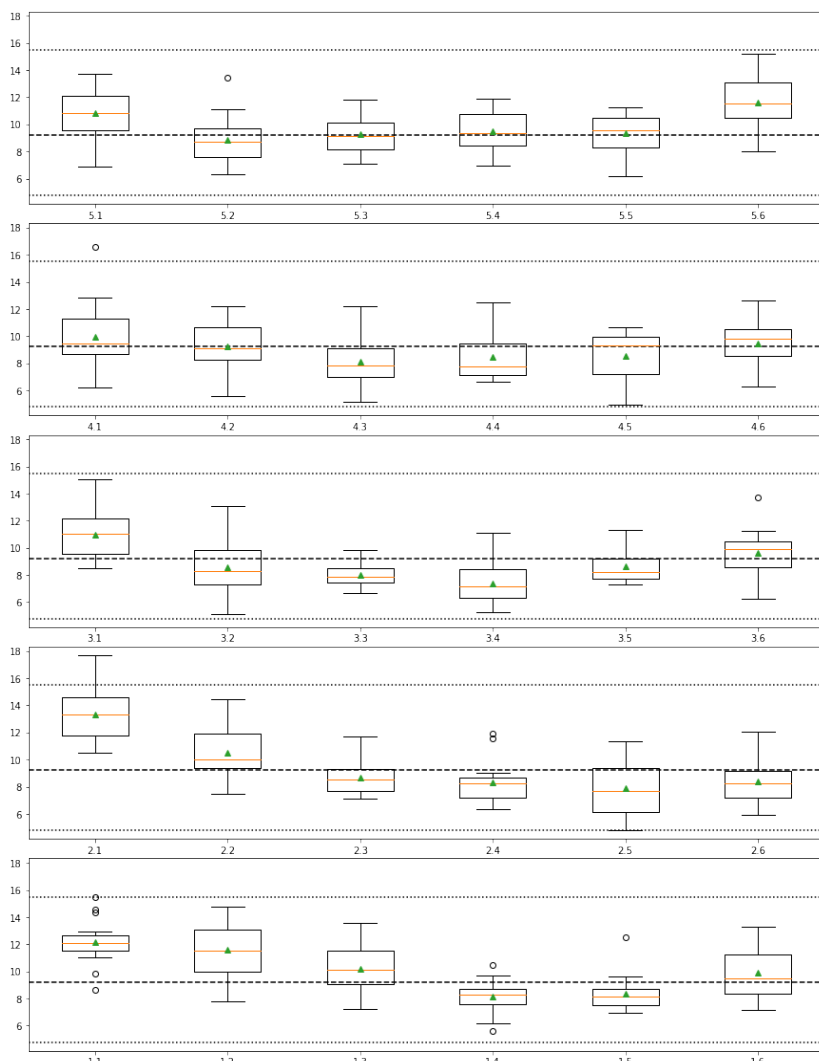


Рисунок 3 – Представление результатов измерений шероховатости в виде «боксплотов».

Формы графиков шероховатости схожи с формами графиков размеров, что предположительно связано с качеством формирования нового слоя порошка.

#### Выводы:

Анализ результатов показал, что разброс размеров по всем измерениям составляет 125 мкм на размере 15 мм, что соответствует 11-12 качеству [2], однако размещение изделий в определённых зонах принтера (преимущественно в центральных) поможет достичь 7-8 качества.

Анализ результатов измерения шероховатости показал схожую зависимость от расположения, что может быть связано с теми же факторами, которые влияют на точность размеров.

Разброс значений шероховатости составляет от Ra 4-16 мкм. Для достижения лучших показателей шероховатости – образцы следует располагать в центральной части рабочего стола принтера.

Рекомендации по расположению образцов в рабочей камере принтера приведены на рисунке 11. При этом зоны для печати разделены на три:

- Зеленая зона – 7-8 качество; Ra 4-10
- Желтая зона – 9-10 качество; Ra 7-12
- Красная зона – 11-12 качество; Ra 7-16

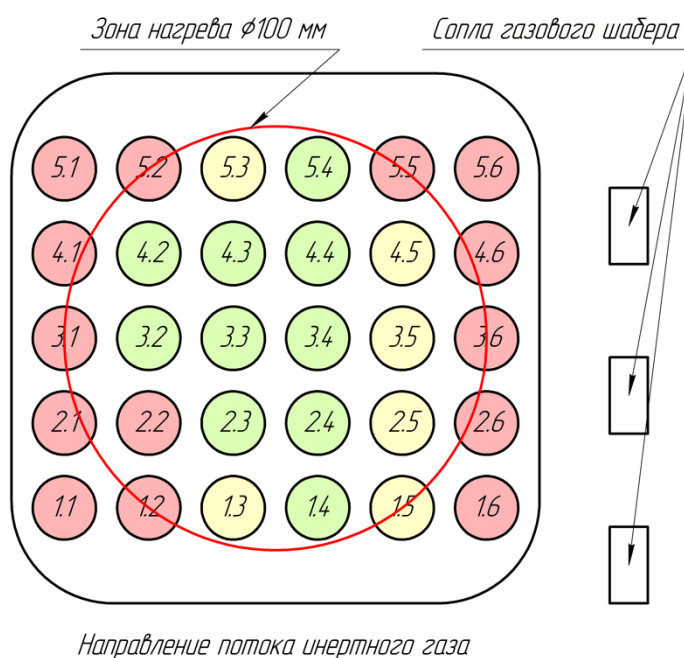


Рисунок 4 – Рекомендации по расположению.

Как мы видим, на рисунке 4, зоны по краям являются наименее предпочтительными для установки образцов, связано это скорее всего с тем, что эти образцы не попадают в зону над нагревателем, так же в этих местах неравномерен обдув газовым шабером, справа поток не успевает сформироваться, слева поток ослабевает. Правый верхний и левый нижний угол платформы так же попадают в красную зону в связи с особенностью данного принтера в нанесении нового слоя порошка. В зелёной зоне наиболее стабильные технологические параметры синтеза и в следствие этого получаем более стабильные исследуемые показатели качества.

Для подтверждения данных выводов требуется дополнительное исследование качества формирования нового слоя порошка при печати и оптимизации обдува сформированного слоя.

*Использованные источники:*

1. ГОСТ 25346-2013 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2015-07-01 / Росстандарт – Официальное издание. Москва: Стандартинформ, 2019. – 45 с.
2. Стратегия развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 июля 2021 г. № 1912-р.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СПАЙКИ ФИЛАМЕНТА

Саманова А.И., Тельгерекова С.А.  
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[nastyasamanova@gmail.com](mailto:nastyasamanova@gmail.com), [telgerekovasofia@gmail.com](mailto:telgerekovasofia@gmail.com)

Аннотация. Данная работа посвящена проектированию устройства для спайки  
пластиковых прутков, применяемых в 3D печати по технологии FDM.

*Ключевые слова:* 3D печать, спайка филамента, аддитивное производство,  
технологии

## DESIGN OF A DEVICE FOR FILAMENT SPLICING

Samanova A.I. and Telgerekova S.A.  
FGAOU VO "Snezhinsk Institute of Physics and Technology of National Research Nuclear  
University MEPHI", Chelyabinsk Oblast, Russia.  
[nastyasamanova@gmail.com](mailto:nastyasamanova@gmail.com), [telgerekovasofia@gmail.com](mailto:telgerekovasofia@gmail.com)

Abstract. This work is devoted to the design of a device for soldering plastic rods used in 3D  
printing using FDM technology.

*Key words:* 3D printing, filament splicing, additive manufacturing, technologies

Технология 3D печати представляет собой процесс создания трехмерных объектов  
путем последовательного нанесения слоев материала на основе цифровой модели. В отличие  
от традиционных методов производства, где материалы удаляются или обрабатываются для  
создания объекта, 3D печать позволяет создавать объекты, добавляя материалы по мере  
необходимости.

Основным компонентом технологии 3D печати является 3D принтер, который может  
использовать различные типы материалов, такие как пластик, металл, керамика и даже  
органические вещества. Процесс печати начинается с создания цифровой модели объекта с  
помощью специального программного обеспечения или сканирования существующего  
объекта. Затем модель разбивается на тонкие слои, и 3D принтер начинает наносить материал  
слой за слоем, пока не создастся полноценный трехмерный объект.

Данная технология имеет широкий спектр применений начиная от прототипирования и  
производства заканчивая медициной и дизайном. Она позволяет создавать сложные  
геометрические формы, которые трудно или невозможно получить с помощью традиционных  
методов производства. Благодаря своей гибкости и точности, 3D печать становится все более  
популярной и востребованной технологией в различных отраслях.

Поскольку главный принцип 3D-печати — «прибавляй, а не вырезай», при аддитивном  
производстве образуется значительно меньше отходов, которые не подлежат переработке. Но  
даже такое экологичное производство не исключает не рациональное потребление пластика,  
при котором мелкие остатки нитей после печати просто выбрасываются и не только  
загрязняют окружающую среду, а также только за один год сбора подобных остатков может  
накопиться до нескольких килограмм пластика которые могут в дальнейшем использоваться  
в производстве, но из-за своих размеров возможности их применения значительно сокращены.  
Для того, чтобы использовать эти остатки в дальнейшей печати, необходимо устройство для  
их спайки. Целью данной работы является: проектирование устройства для спайки  
филамента.

Для достижения результата, следовало выполнить следующие задачи:

1. Изучение свойств металлов и различных филаментов
2. Поиск имеющихся аналогов
3. Разработка концепции продукта
4. Создание устройства

Аналогов данного устройства мало, они выставлены в свободную продажу и минимальная цена 12000. Работают аналоги только с пластиками, которые не превышают температуру нагрева 210. По сравнению с аналогами спроектированное устройство способно работать в температурном диапазоне от 170 до 450 с, что позволяет спаивать такие распространенные филаменты как: PLA, ABS, HIPS, SBS, PETG, PVA и т.д. Учитывая такой большой диапазон используемых филаментов, его цена ниже рыночной.

*Использованные источники:*

1. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) / В. А. Валетов. – Санкт-Петербург: Министерство образования и науки российской федерации университет ИТМО, 2015. – 58 с.
2. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013. – 222 с.
3. Федоренко, В. Ф. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники / В. Ф. Федоренко, И. Г. Голубев. — 2-е издание — Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 137 с. — (Высшее образование).

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Сериков А.С., Лысенко О.В., Горбокони́на О.И.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[bvn@vniitf.ru](mailto:bvn@vniitf.ru)

В работе проведены исследования по синтезу порошка  $\alpha$ -оксида алюминия, методом осаждения с последующей термообработкой прекурсора.

Выбраны оптимальные условия осаждения для получения монофазного порошка  $\alpha$ - $Al_2O_3$ . Определены фазовый состав синтезируемых порошков.

*Ключевые слова: порошок  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , метод осаждения.*

## INFLUENCE OF SINTERING PARAMETERS ON PHASE EVOLUTION OF ALUMINA

Serikov A.S., Lysenko O.V., Gorbokonina O.I/  
FSUE "RFNC - ARITP named after academician Ye.I. Zababakhin", Snezhinsk, Chelyabinsk  
region  
[bvn@vniitf.ru](mailto:bvn@vniitf.ru)

The work carried out studies on the synthesis of  $\alpha$ -alumina powder doped by precipitation followed by heat treatment of the precursor.

Optimal precipitation conditions were selected for the production of monophasic  $\alpha$ - $Al_2O_3$  powder. The phase composition,  $Al_2O_3$  powder were determined.

*Key words:  $\alpha$ - $Al_2O_3$  powder, precipitation.*

Оксид алюминия является одним из компонентов при получении оптически прозрачной керамики на основе иттрий-алюминиевого граната. Основным условием получения керамических образцов с высокими значениями коэффициента пропускания является фазовая чистота оксида алюминия – для синтеза необходимо использовать только  $\alpha$ - $Al_2O_3$  (корунд). Фазовые переходы метастабильных оксидов алюминия в стабильную модификацию корунда сопровождаются уменьшением объема частиц на 8 - 10 %, что приводит к образованию пористости внутри керамических образцов и ухудшению оптических характеристик. Увеличение температуры синтеза корунда приводит к образованию сильноагломерированного порошка, что также снижает оптические характеристики керамических образцов, синтезируемых на основе корунда.

Известно [1-3], что фазовый состав синтезируемых порошков оксида алюминия напрямую зависит от условий получения прекурсоров оксида алюминия – гидроксидов и карбонатов алюминия. Варьирование условий синтеза может позволить получить монофазный корунд при минимальных температурах синтеза.

Целью работы являлось получение монофазного порошка корунда при минимальных температурах и изучение влияния изменений условий синтеза на фазовый состав синтезируемого порошка оксида алюминия.

### Материалы

В качестве исходного материала для синтеза оксида алюминия использовали нитрат алюминия 9-водный (ГОСТ 3757-75 квалификация «чда»). Синтез оксида алюминия проводили методом осаждения, который позволяет получать мелкодисперсные порошки с минимальным количеством примесей. В качестве осадителя использовали гидрокарбонат аммония (ГОСТ 3762-78 квалификация «хч»).



### Методы исследования

Для контроля фазового состава синтезированных порошков иттрий-алюминиевого граната использовали рентгенофазовый анализ. Рентгенофазовый анализ выполнен на излучении  $\text{CuK}\alpha$  в диапазоне углов  $2\theta$  с 15 до 70 градусов, с шагом  $\sim 0,02$  градуса, время накопления импульсов  $\sim 2,5$  секунды. Режим съемки:  $U=40$  кВ,  $I=40$  мА. При определении фазового состава образцов была использована картотека данных.

#### Определение влияния температуры термической обработки на фазовый состав получаемого оксида алюминия

Синтез прекурсоров оксида алюминия проводили методом обратного осаждения 0,02 молярного раствора нитрата алюминия гидрокарбонатом аммония с концентрацией 0,25 моль/л. Осаждение солей проводили при постоянном контроле и поддержании значения pH маточного раствора, которое составляло 7. Скорость подачи раствора нитрата алюминия составляла 2-3 мл/мин. Скорость подачи осадителя регулировали так, чтобы значение pH маточного раствора оставалось постоянным. Осаждение и «старение» проводили при постоянном перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 200-300 об./мин. Продолжительность «старения» осадка составляла 3 часа. После «старения» осадок отфильтровывали на вакуум-филт্রে, 3-4 раза промывали дистиллированной водой и 1 раз – этиловым спиртом. Отфильтрованный осадок сушили при температуре 80°C в течение 10-24 часов. После сушки, полученные прекурсоры прокаливали при температурах 800, 1000 и 1100°C в течение 2 часов.

#### Влияние продолжительности «старения» осадка на фазовый состав получаемого оксида алюминия

Синтез прекурсоров оксида алюминия проводили методом обратного осаждения, описанным выше. Продолжительность «старения» осадка составляла 3, 6, 12 и 24 часа. После «старения» осадок отфильтровывали на вакуум-филт্রে, 3-4 раза промывали дистиллированной водой и 1 раз – этиловым спиртом и сушили при температуре 80°C в течение 10-24 часов. После сушки полученные прекурсоры прокаливали при температуре 1100°C в течение 2 часов.

### Результаты

При термической обработке прекурсоров до температуры 1000 °C образуется  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . При увеличении температуры выдержки до 1100 °C образуется смесь  $\alpha$ - и  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Данная температура начала фазового перехода согласуется с литературными данными [1].

Изменение времени старения осадков с 3 до 24 часов с последующей термообработкой прекурсоров при температуре 1100 °C приводит к образованию:

- смеси  $\alpha$ - и  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  при 3 часах старения (рис. 1);
- $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  при 6 часах старения;
- смесь  $\alpha$ - и  $\Theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  при более 6 часов старения (рис. 2).

При увеличении времени старения осадка с 3 до 6 часов увеличивается степень кристалличности оксидов алюминия, что подтверждается увеличением интенсивности дифракционных линий на дифрактограммах.

В результате проведенной работы был получен монофазный порошок  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  при минимальной температуре, составившей 1100 °C. Показано, что время старения прекурсора оказывает влияния на фазовый состав синтезируемого оксида алюминия.

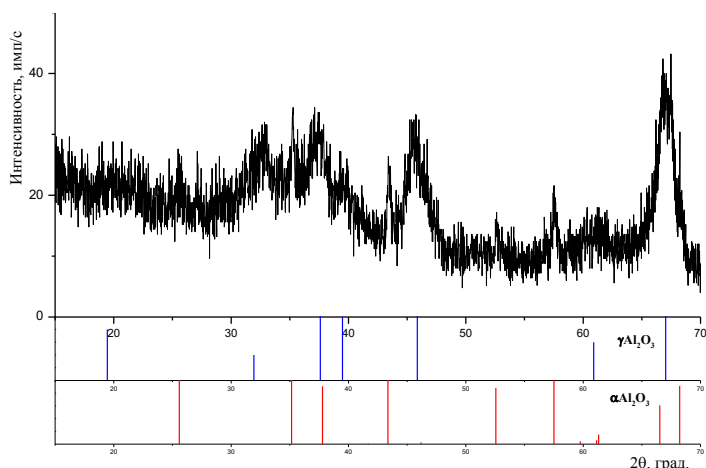


Рис. 1. Диффрактограмма образца оксида алюминия, полученного осаждением гидрокарбонатом аммония, со старением в течение 3 часов и термической обработкой при температуре 1100 °С в течение 2 часов

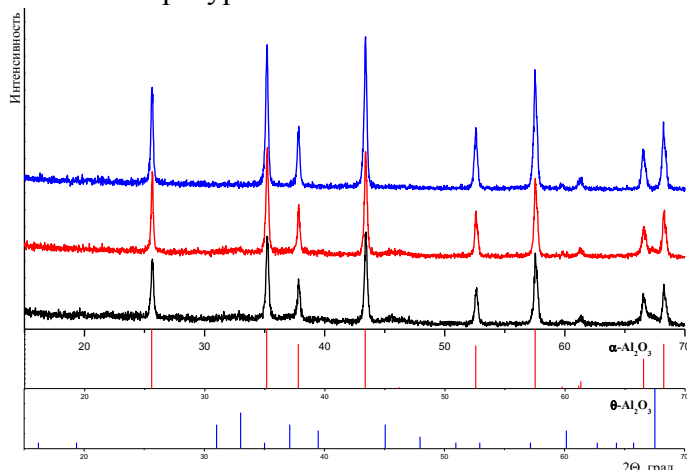


Рис. 2. Диффрактограмма образцов оксида алюминия, полученных осаждением гидрокарбонатом аммония со старением в течение:  
6 ч и термической обработкой при температуре 1100 °С в течение 2 ч - синяя линия  
12 ч и термической обработкой при температуре 1100 °С в течение 2 ч - красная линия  
24 ч и термической обработкой при температуре 1100 °С в течение 2 ч - черная линия

*Использованные источники:*

1. Клишин А.П. Формирование кристаллических фаз в оксидах алюминия и циркония в постоянном магнитном поле при спекании компактированных порошков: специальность 01.04.07 “Физика конденсированного состояния”: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Клишин Андрей Петрович Томский Государственный педагогический университет. – Томск, 2020. – 173 с. Библиогр: с 154-173. Текст: непосредственный.
2. Семенов Е.А. Разработка физико-химических основ получения наноразмерных порошков оксидов и гидроксида алюминия (бемита): специальность 02.00.04 “Физическая химия”: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Семенов Евгений Алексеевич Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН. – Москва, 2019 – 194 с. Библиогр: с 176-194. Текст: непосредственный.
3. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. - Москва: Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. – 288 с.

## ПОДБОР ЖАРСТОЙКОГО СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛИВНОЙ ФИЛЬЕРЫ МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ДИЗАЙНА ФГУП «ПО «МАЯК»

Стаканова Н.А., Пичугина Л.О., Карзанов Ю.А., Поляков Е.В.  
ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская обл.  
[mayak@po-mayak.ru](mailto:mayak@po-mayak.ru)

В начале 2024 года планируются испытания третьей версии малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» для отверждения высокоактивных ЖРО в боросиликатное стекло.

Ранее проведенные испытания, первой и второй версии плавителя показали, что критическим узлом для обеспечения нормальной эксплуатации малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» в течении требуемого срока является индукционно нагреваемая сливная фильера.

Фильера и донный электрод изготавливаются из сплава ХН70Ю и при эксплуатации они подвергаются локальным воздействиям, критических (до 1250 °С), для данного сплава, температур, а также коррозионному и эрозионному воздействию со стороны расплава боросиликатного стекла. При испытаниях экспериментальной печи наблюдалась закупорка сливного канала фильеры за счет частичного расплавления донного электрода.

Для зарубежных плавителей не отмечено случаев выхода из строя электродов и сливного устройства, что, возможно, связано с наличием в сплаве Inconel 690 (отечественным аналогом которого, наиболее близким по составу, является сплав ХН70Ю) микроколичеств легирующих добавок, существенно повышающих коррозионную и термическую стойкость.

Таким образом, для надежной продолжительной эксплуатации плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» сохраняет свою актуальность проблема поиска жаростойкого сплава для изготовления сливной фильеры, превосходящего по характеристикам сплав ХН70Ю.

Для подбора подходящих сплавов доступных на Российском рынке, был проведен обзор существующих материалов, используемых в промышленности в качестве жаропрочных и жаростойких.

По результатам поисковой работы выделены три категории материалов, подходящих по своим эксплуатационным свойствам к условиям работы фильеры и донного электрода:

- 1) Классические жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы (ХН60Ю, 10ХН45Ю, Х23Ю5Т);
- 2) Керамико-металлические композиты (Ni-Cr-C);
- 3) Жаропрочные сплавы из платины (СКМ, ДУ Pt, ДУПС ПлРд10, ПлРд10).

По результатам оценки коррозионной стойкости каждого из типов материалов в расплавах стекла будет дана оценка их применимости в качестве конструкционного материала фильеры и донного электрода малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк».

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ПРОДУКЦИИ ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ушков А.В., Шарапов И.К.  
 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», Снежинск, Челябинская обл.

В настоящее время в НИИКе для получения данных по температурному режиму испытываемых объектов испытаний (ОИ) кроме датчиков температуры используется тепловизор.

Тепловизионная техника имеет ряд преимуществ по сравнению с контактными методами измерения температуры. Она представляет информацию о характере распределения температуры на поверхности ОИ и температуре любой точки наружной поверхности ОИ.

Тепловизор является компактным устройством в отличие от системы измерений с помощью термопреобразователей. Он позволяет при проведении тепловых и климатических испытаний объектов получать устойчивые термограммы объектов и определять температурные поля в различные моменты времени.

Тепловизор применялся для определения теплофизических характеристик материалов ОИ, в частности их степени черноты и температуропроводности.

В справочной литературе значение степени черноты и температуропроводности материала представлено в определенном интервале, а для некоторых материалов такие сведения вообще отсутствуют. В НИИК созданы системы для определения теплофизических характеристик материалов (ТФХМ) ОИ (см. рис.1, 2).

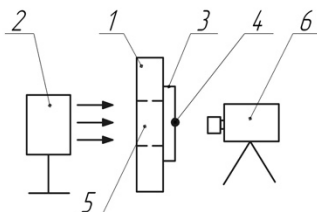


Рис.1. Система для определения степени черноты ОИ

1 - стеклотекстолитовая плита; 2 - нагреватель мощностью 3 кВт; 3 – ОИ; 4 - преобразователь термоэлектрический; 5 - сквозное отверстие; 6 - тепловизор.

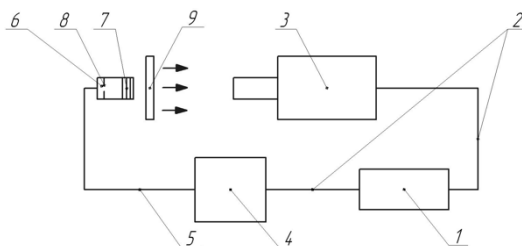


Рис.2. Система для определения температуропроводности ОИ

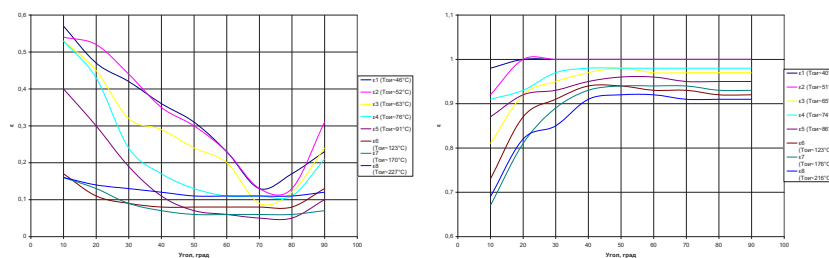
1 - компьютер; 2 - USB-кабель; 3 - тепловизор; 4 - источник лазерного излучения; 5 - оптоволоконный кабель; 6 - коллиматор; 7 - оптическая система; 8 – затвор; 9 – ОИ.

С помощью созданных систем определены конкретные значения степени черноты для исследуемых материалов ОИ (см. таблицу 1)

Таблица 1

№	Материал поверхности	Тип покрытия
1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97, шероховатость Rz40	Хим. окс. э.
2	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97, шероховатость Rz40	Ан. окс. нхр.

Примеры зависимости значения степени черноты от угла визирования и температуры представлены на рис.3.



а) материал №1

б) материал №2

Рис.3. Зависимость значения степени черноты ОИ от угла визирования и температуры

По результатам проведенных работ получен патент на полезную модель «Система для определения температуропроводности материалов», зарегистрированная в Роспатенте под №181470, дата приоритета 08.04.2016г.

Помимо диагностики температурного поля изделий и определения ТФХМ ОИ тепловизор нашел применение и в других сферах деятельности института:

Во-первых, при разработке технологических процессов. Так, например, тепловизионный контроль при изготовлении труб, с применением метода сварки позволил выявить причину изменения его геометрических размеров (коробление) и провести корректировку технологического процесса сварки.

Результаты представлены на термограмме (см. рис.4):

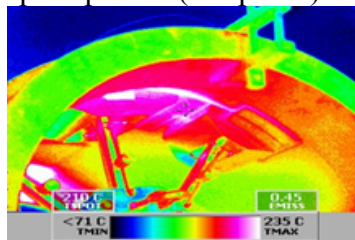
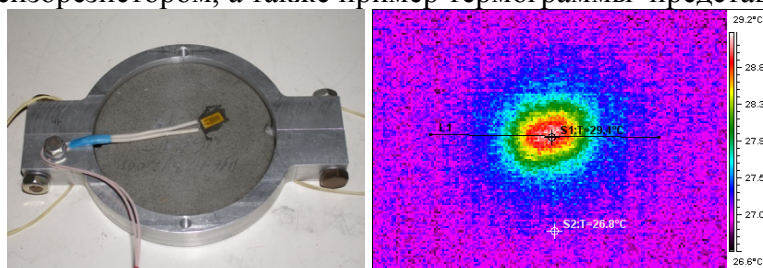


Рис. 4. Термограмма корпуса в процессе сварки

Во-вторых, тепловизор применялся при разработке измерительных систем. Определена степень разогрева тензорезистора КФ5П1-5-100-А-12 при подаче на него электрического напряжения с использованием различных измерительных систем. Разогрев тензорезистора может составлять до  $\sim 4,5^{\circ}\text{C}$  от исходного состояния, что приводит к возникновению увеличения погрешности измерений более чем на 10%. Внешний вид сборки с приклеенным тензорезистором, а также пример термограммы представлены на рис. 5.



а)

б)

Рис.5. Внешний вид сборки и пример термограммы

В-третьих в работах по конверсионной тематике. Так, в работах по водородной энергетике были проведены серии пилотных экспериментов по поискам нижнего, верхнего концентрационного предела поджига водорода в воздухе, а также предельной концентрации водорода при которой пламя распространяется во всех направлениях. Впервые в Госкорпорации «Росатом» проведена инфракрасная съемка тепловизором теплового поля распространения взрывной волны газоводородной смеси (см. рис. 6).



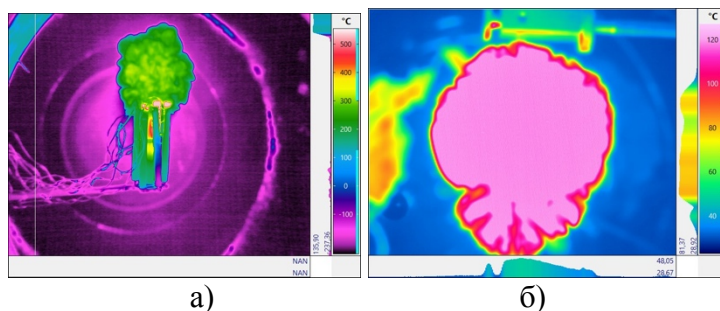


Рис.6. Примеры термограмм распространения взрывной волны

Применение тепловизора позволило увидеть термики, локальные воспламенения водорода, проходящие мимо термопреобразователей и не регистрируемые датчиком давления вследствие малой мощности. Тепловизор увидел их и позволил заснять процесс зарождения и подъема вверх и характер увеличения пламени (см.рис.7).

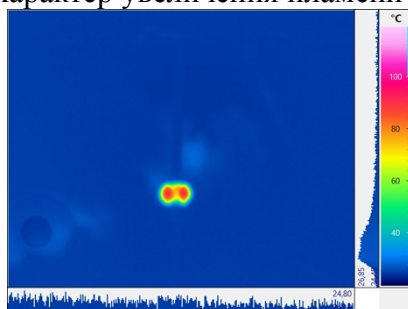


Рис.7. Термограмма термика

В работах по водородной безопасности получены значения времени полупоглощения водорода. При помощи съемки тепловизором получено изображение распределения температуры на каталитических стержнях (см.рис.8, 9).

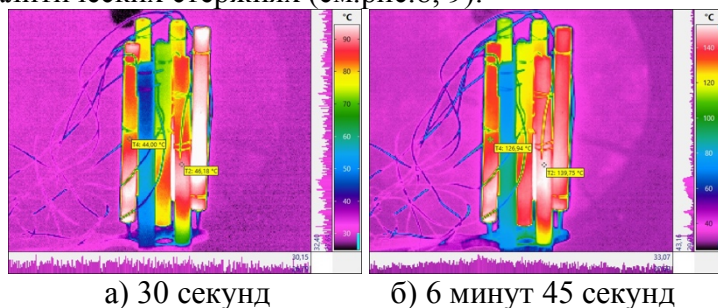


Рис.8. Термограммы каталитических стержней в различные моменты времени

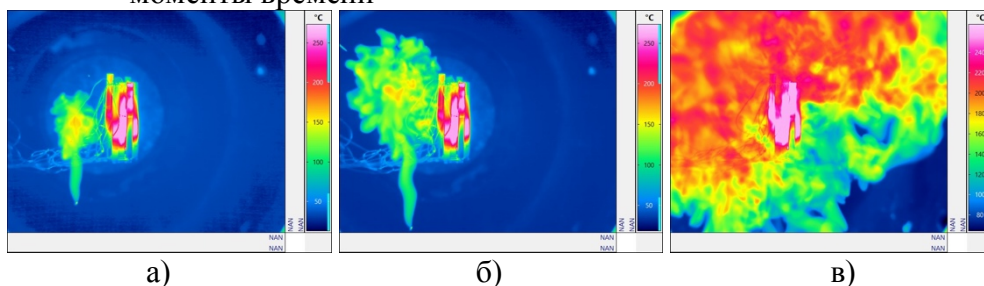


Рис.9. Примеры термограмм

Тепловизор нашел применение и в других областях применения, не относящихся к ЯОК:

- Применение тепловизионной диагностики в энергетике основано на том, что наличие некоторых видов дефектов высоковольтного оборудования вызывает изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного (ИК) излучения.
- Тепловизор позволяет быстро и точно выявить дефектные участки строительных сооружений и определить их границы.

Результаты проделанных работ представлены на рис.10.

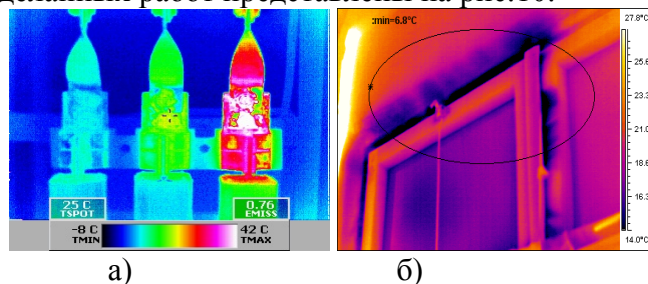


Рис.10

- Предложен простой способ поиска аварийного участка теплотрассы с помощью тепловизионной аппаратуры. Применение тепловизионной аппаратуры позволило с определенной точностью выявить место утечки теплоносителя из теплотрассы, уменьшив зону вскрытия асфальта и грунта над паропроводом (см.рис.11).

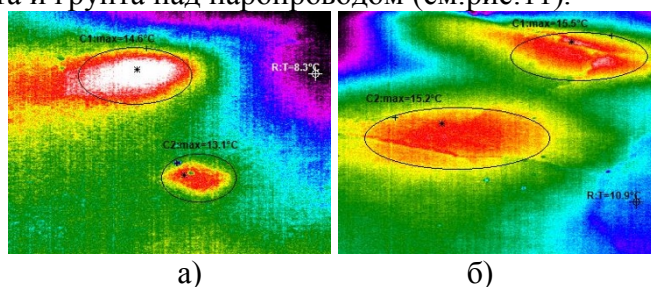


Рис.14

- Тепловизор применялся при тушении лесных и торфяных пожаров. Он помог находить и локализовывать скрытые очаги горения, не видимые человеку. Примеры представлены на рис.15.

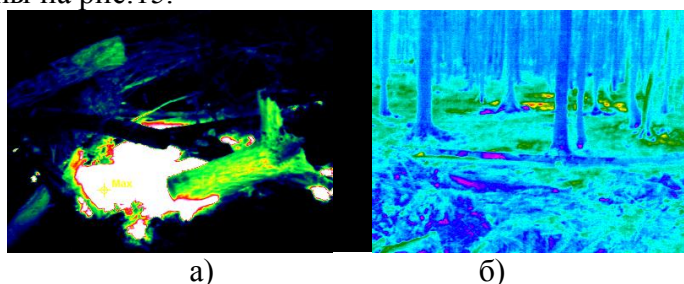


Рис.15

Применение инфракрасной термографии при проведении испытаний продукции военного и гражданского назначения находит широкое применение. В настоящем докладе рассмотрена лишь малая часть возможного применения инфракрасной термографии в РФЯЦ-ВНИИТФ. В НИИК ведутся работы для расширения областей применения инфракрасной термографии.



## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Фазлитдинова А.Г., Тюменцев В.А.

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск, Челябинская обл.

[fazlitdinovaag@mail.ru](mailto:fazlitdinovaag@mail.ru)

В работе методами рентгеноструктурного анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния изучены закономерности изменения тонкой структуры углеродных материалов, прошедших термообработку при 1000-3000°C. Информацию о тонкой структуре материала получали путем анализа профиля асимметричных дифракционных максимумов 002 и 004. Полученные данные позволяют предположить, что процесс графитации углеродного материала, по-видимому, развивается через ряд метастабильных состояний.

*Ключевые слова: рентгеноструктурный анализ, анализ профилей дифракционных максимумов, метастабильные состояния.*

## FEATURES OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OF CARBON MATERIALS DURING THERMOMECHANICAL TREATMENT

Fazlitdinova A.G., Tyumentsev V.A.

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Chelyabinsk region

[fazlitdinovaag@mail.ru](mailto:fazlitdinovaag@mail.ru)

In this work, using X-ray diffraction analysis and Raman spectroscopy, the patterns of changes in the fine structure of carbon materials that have undergone heat treatment at 1000-3000°C have been studied. Information about the fine structure of the material was obtained by analyzing the profile of the asymmetric diffraction maxima 002 and 004. The data obtained suggest that the process of graphitization of the carbon material apparently develops through a series of metastable states.

*Key words: X-ray diffraction analysis, analysis of diffraction peak profiles, metastable states.*

Физико-химические свойства искусственных графитированных материалов, углеродных волокон, механически диспергированных графитов определяются конечной микроструктурой, в частности, размерами ОКР и текстурой, пространственной однородностью по химическому и фазовому составу, формирование которых зависит от последовательности фазовых и химических превращений. Структурные превращения углеродного материала в графит при высокотемпературной и термомеханической обработке, а также разрушения структуры графита в процессе нейтронного облучения или длительного механического диспергирования были предметом многочисленных исследований [1-3]. В ряде работ получены данные по монотонному росту размеров ОКР и уменьшению межплоскостного расстояния  $d_{002}$  по мере повышения температуры или увеличения продолжительности изотермической обработки как хорошо, так и трудно графитирующихся углеродсодержащих материалов. Вместе с тем показано, что по мере повышения температуры или продолжительности высокотемпературной обработки изменение  $d_{002}$  может развиваться ступенчато, наблюдаются плато при значениях, равных 3.36, 3.37, 3.40, 3.425 и 3.44 Å. Такое изменение  $d_{002}$  может быть обусловлено формированием метастабильных углеродных фаз, отличающихся значением межплоскостного расстояния. В данной работе методами рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) рассмотрены особенности структурных превращений углеродных материалов в процессе термомеханической обработки.

Исследования структурных превращений в процессе графитации проведены на углеродных материалах, прошедших термообработку при 1000-3000°C. Рентгеновские дифракционные исследования выполнены на фильтрованном  $\text{CuK}\alpha$  излучении (дифрактометр D8 Advance, Bruker). КР спектры образцов получены с помощью лазерного КР спектрометра фирма EnSpectr с длиной волны 532 нм, оснащенного микроскопом и цифровой камерой.

Показано, что профили дифракционных максимумов 002 образцов углеродного материала, прошедших термообработку при 1000-3000°C, а также после диспергирования графита, не симметричные (рис.1). Это может быть обусловлено одновременным присутствием метастабильных углеродных фаз, отличающихся значением межплоскостного расстояния (обозначим фазы, соответствующие  $d^1_{002} = 0,336$ ,  $d^2_{002} = 0,337$ ,  $d^3_{002} = 0,340$ ,  $d^4_{002} = 0,3425$ ,  $d^5_{002} = 0,3440$  и  $d^6_{002} = 0,355/0,368$  нм, как  $K_1$ ,  $K_2$ , ...  $K_6$ ). Нами выполнен анализ профилей асимметричных дифракционных максимумов 002 и 004 образцов углеродных волокон, полученных при различных режимах термообработки [4]. Показано, что в каждом случае формируются три компоненты, суммарный максимум которых совпадает с экспериментально наблюдаемым (коэффициент детерминации  $R^2$  достигает 0,9999), рис.1 «а». Материал исследованных углеродных волокон, полученных по существенно отличающимся режимам, гетерогенен, его компонентный состав определяется режимами термомеханической обработки.

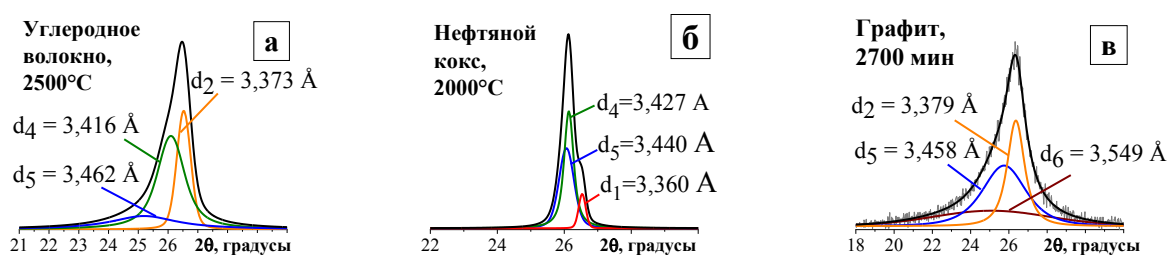


Рис.1. Разделение на компоненты асимметричных дифракционных максимумов 002 образцов углеродного волокна (а), композита на основе нефтяного кокса (б) и графита, диспергированного в течение 2700 минут

В хорошо графитирующемся углеродном материале в процессе термообработки формируются метастабильные состояния, межплоскостное расстояние которых достаточно хорошо совпадает с данными, приведенными в [3], рис.2. В материале на основе нефтяного кокса после обработки при 1200-1400 и 1600°C формируются фазы  $K_5$ ,  $K_6$  и  $K_1$ ,  $K_5$  соответственно. При температурах обработки 1800-2000°C углеродный материал трёхкомпонентный:  $K_1$ ,  $K_4$  и  $K_5$ , рис.2«а». Структурные преобразования материала на основе пекового кокса наблюдаются только при температуре обработки 1900°C. После термообработки в течение 3 часов в образце обнаруживаются достаточно крупные кристаллы метастабильного состояния с  $d_{002} = 3,425\text{Å}$ , рис.2«б».

Структурная неоднородность углеродных материалов фиксируется спектроскопией комбинационного рассеяния. В процессе высокотемпературной обработки на КР спектрах исследуемых образцов наблюдаются характерные для углерода линии первого порядка D ( $\sim 1350\text{ см}^{-1}$ ), G ( $\sim 1580\text{ см}^{-1}$ ), а также линия второго порядка 2D ( $\sim 2700\text{ см}^{-1}$ ), рис.3а. Важным параметром является соотношение интенсивностей  $I_D/I_G$ , определяющее степень разупорядоченности материала и размеры кристаллитов [5]. В процессе картографирования по образцу с шагом 500 мкм ( $\sim 60$  измерений на каждый образец) наблюдается изменение соотношения  $I_D/I_G$  (рис.3«б» и «в»). Степень разупорядоченности углеродного материала, прошедшего термообработку при 1200°C, составляет  $\sim 0,83$ . По мере повышения температуры обработки значение  $I_D/I_G$  постепенно уменьшается, при температурах 2400 и 2600°C составляет  $\sim 0,31$ .

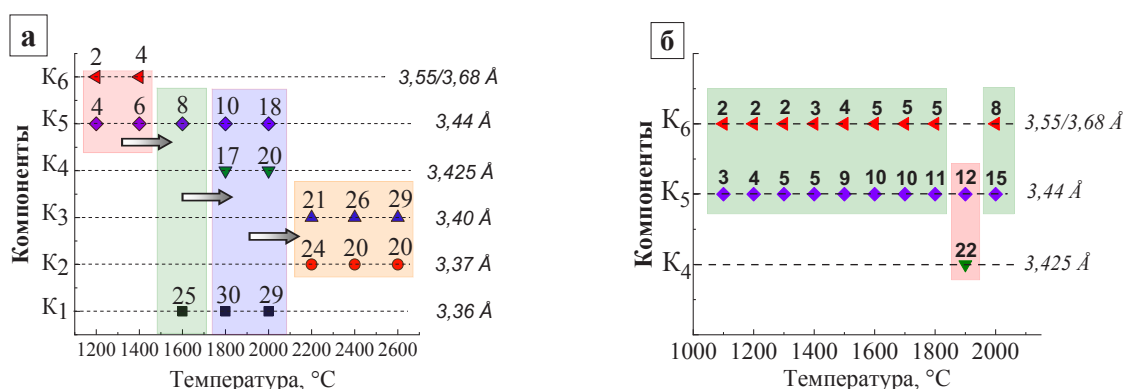


Рис. 2. Изменение компонентного состава углеродного материала, прошедшего термообработку от 1000 до 2600°C на основе нефтяного (а) и пекового коксов (б). Над маркером обозначены средние размеры ОКР ( $L_{002}$ ), нм

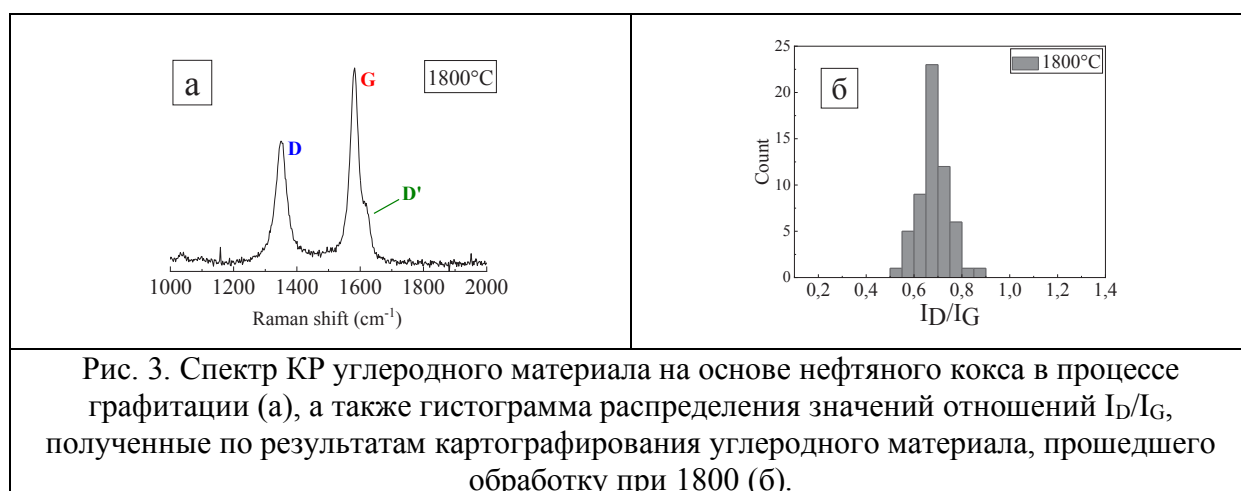


Рис. 3. Спектр КР углеродного материала на основе нефтяного кокса в процессе графитации (а), а также гистограмма распределения значений отношений  $I_D/I_G$ , полученные по результатам картографирования углеродного материала, прошедшего обработку при 1800 (б).

Таким образом, анализ профилей дифракционных максимумов углеродного материала позволяет получить данные о его тонкой структуре. В процессе высокотемпературной термомеханической обработки развивается рекристаллизация углеродного материала, сопровождающаяся формированием метастабильных состояний, структурные параметры которых зависят от температуры обработки.

*Использованные источники:*

1. F. Liu F., H.Wang, L.Xue // Mater. Sci. 2008. V.43, N.10. P. 4316-4322;
2. V.M. Samoilov, D.B. Verbets, I.A. Bubnenkov, N.N. Stepanyova, et al. // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. V.9, N.5. P. 890-899;
3. J. Lachter, R.M. Bragg // Phys. Rev. B. 1986. V.33, N.12. P. 8903-8905;
4. Тюменцев В.А., Фазлитдинова А.Г. // ЖТФ. 2016. Т.86 (3). С. 62-69;
5. M.A. Primenta, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, et al. // Physical Chemistry Chemical Physics. 2007. V.9. P.1276-1291.

## НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СВАРКЕ АЛЮМИНИЯ С ПОЛНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

Филимоненко А.Г., Гареев И.С., Собко С.А.

Белоусов С.В., Иванов М.В.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

[mspisarev@vniitf.ru](mailto:mspisarev@vniitf.ru)

В работе представлена конструкция сварного соединения, обеспечивающая бездефектную сварку со сквозным проваром деталей из алюминиевого сплава большой толщины.

*Ключевые слова:* толстостенные конструкции, сварка неплавящимся электродом, алюминиевый сплав, конструкция сварного соединения, сквозное проплавление, разделка кромок, стыковое соединение.

### NEW WELDED JOINT DESIGN AS APPLIED TO FULL PENETRATION ALUMINUM WELDING

A.G. Filimonenko, I.S. Gareev, S.A. Sobko, S.V. Belousov, M.V. Ivanov.

FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Chelyabinsk region

[mspisarev@vniitf.ru](mailto:mspisarev@vniitf.ru)

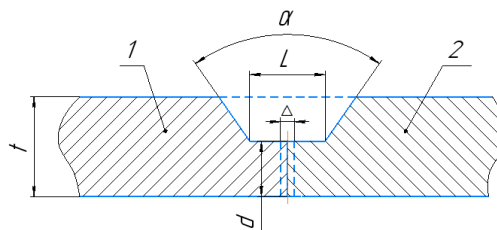
The work presents a welded joint design that ensures defect-free welding with trough penetration of thick aluminum alloy parts.

*Key words:* thick-walled designs, welding with a non-melting electrode, aluminum alloy, welded joint design, through penetration, edges penetration, butt joint.

Алюминиевые сплавы используют в сварных конструкциях различного назначения. Основными достоинствами его как конструкционного материала являются малая плотность, высокая удельная прочность, высокая коррозионная стойкость [1].

Из-за высокой теплопроводности алюминия тепло от места сварки быстро распространяется по всей детали, что существенно уменьшает глубину провара. Это особенно критично при сварке деталей большой толщины. Для обеспечения полного проплавления приходится прибегать к технологическим приемам в виде предварительного подогрева деталей, сварки с зазором, выполнение разделки кромок с двух сторон и т.д. Однако при производстве крупногабаритных конструкций из металла больших толщин не всегда представляется возможным выполнять с двух сторон требуемую разделку кромок. Поэтому разработка новых способов сварки и конструкций сварных соединений, обеспечивающих высокую производительность и качество сварного шва, применительно к сварке алюминиевых элементов больших толщин представляются весьма актуальным [2].

Настоящая конструкция [3] может быть использована применительно к сварке корпусных деталей из алюминиевого сплава толщиной от 8 мм и более.



1, 2 – свариваемые детали;

t – толщина свариваемых деталей, мм ; d – толщина выступа, мм;

L – длина выступа, мм ,  $\alpha$  – угол разделки кромок;  $\Delta$  – припуск на усадку стыкового шва

Рисунок 1 – Конструкция сварного соединения

На кромках свариваемых деталях 1 и 2 предусмотрены выступы толщиной  $d$  от 3,0 до 6,0 мм при толщине стенки деталей  $t \geq 8,0$  мм в соответствии с соотношением  $d/t \leq 0,75$ . При этом длина выступа кромок должна удовлетворять условию  $L < (3d + \Delta)$ , где  $\Delta$  – припуск на усадку стыкового шва. Также предусмотрена разделка кромок деталей с приданием скоса под углом разделки кромок в интервале  $65^\circ < \alpha < 75^\circ$  градусов.

Для обеспечения сквозного проплавления однопроходная сварка стыка выполняется в среде инертного газа (гелия) автоматической дуговой сваркой с формированием корня шва на весу с шириной шва  $B < L$ , рисунок 2 а). Пространство между скосами двух кромок после охлаждения корня шва заполняется валиками многопроходной дуговой сваркой в смеси защитных газов (аргон + гелий в соотношении 30% Ar и 70% He) с использованием присадочной проволоки. При этом первый валик формируется по центру относительно стыка, а каждый последующий валик после первого смещается относительно предыдущего на половину его ширины. Первые шесть валиков выполняются после охлаждения каждого предыдущего до комнатной температуры, а начиная с седьмого, валики формируют без промежуточного охлаждения, рисунок 2 б).



Рисунок 2 – Схема выполнения сварного шва

На рисунке 3 приведен вид поперечного сечения сварного соединения образца из сплава АМг6 толщиной 12 мм, выполненного дуговой сваркой неплавящимся электродом в среде инертных газов.



Рисунок 3 – Поперечное сечение сварного соединения

Сварку выполняли за девять проходов. Первый – на постоянном токе в среде гелия без сварочной проволоки, второй и последующие проходы для заполнения разделки – на переменном токе в смеси защитных газов (аргон + гелий в соотношении 30% Ar и 70% He) с применением присадочной проволоки Св-АМг6. Шов равнопрочен основному металлу ( $\sigma_B = 33,5$  кгс/мм<sup>2</sup>).

Таким образом, применение данной конструкции сварного соединения позволяет получать бездефектные и равнопрочные сварные соединения с полным проплавлением при сварке деталей из алюминиевого сплава толщиной от 8 мм и более.

*Использованные источники:*

1. Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. – Москва: Машиностроение, 1977.
2. Зусин В.Я., Сварка и наплавка алюминия и его сплавов / В.Я. Зусин, В.А. Серенко. – Мариуполь: Изд. «Рената», 2004.
3. Патент РФ №2784438 «Способ сварки деталей из алюминиевого сплава», приоритет 08.04.2022 опубликовано 24.11.2022, авторы: И.С. Гареев, С.А. Собко, С.В. Белоусов, А.Г. Филимоненко, М.В. Иванов.



## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СМЕСЕЙ ТЭНА С НАНОДИСПЕРСНЫМ АЛЮМИНИЕМ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ЛАЗЕРНУМУ ИМПУЛЬСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Шишкин<sup>1,2</sup> Н.Я., Глущенко<sup>1</sup> А.Г., Суров<sup>1</sup> М.С., Бакиров<sup>1</sup> А.Р., Сдобнов<sup>1</sup> В.И.,  
Станкевич<sup>1</sup> А.В., Грибанов<sup>1</sup> Д.А., Долгих<sup>1</sup> С.М.

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

В работе проведены результаты исследования влияния технологии изготовления смесей тэна с нанодисперсным алюминием на чувствительность к лазерному импульсному воздействию. Проведено сравнение двух технологий изготовления смесей: ультразвуковое смешение в инертной среде и сухое смешение в замкнутой электростатической системе.

*Ключевые слова:* ВВ, сухое смешение, ультразвуковое смешение, лазерные импульсы, высокодисперсный тэн, нанодисперсный алюминий, чувствительность

## METHOD OF MIXING PETN WITH NANODISPERSED Al AND ITS INFLUENCE ON SENSITIVITY TO LASER PULSE ACTION

N.Ya. Shishkin<sup>1,2</sup>, A.G. Glushchenko<sup>1</sup>, M.S. Surov<sup>1</sup>, A.R. Bakirov<sup>1</sup>, V.I. Sdobnov<sup>1</sup>,  
A.V. Stankevich<sup>1</sup>, D.A. Gribanov<sup>1</sup>, S.M. Dolgikh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics», Snezhinsk, Russia

<sup>2</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Snezhinsk Physical-Technology Institute (SPhTI) – National Research Nuclear University MEPhI», Snezhinsk, Russia

The present paper describes how the method of preparing mixtures of pentaerythryte tetranitrate (PETN) and nanodispersed Al influences sensitivity to laser pulse action. The method of ultrasonic mixing in inert media was compared to dry mixing in closed electrostatic system.

*Key words:* high explosive (HE), dry mixing, ultrasonic mixing, laser pulses, ultrafine PETN, nanodispersed aluminum, sensitivity

Идея инициирования ВВ лазерным импульсом возникла в СССР в начале 1960-х годов. Исходя из первых экспериментов замечено, что вторичные ВВ являются практически прозрачными для лазерного излучения в ближнем ИК-диапазоне [1]. К концу 1960-х годов возникла идея введения светопоглощающих добавок во вторичные ВВ для уменьшения энергии инициирования [2].

В работе [3] были проведены исследования иницируемости лазерным импульсом смесей тэна с крупнодисперсными добавками различных металлов (алюминий, олово, никель, вольфрам, медь). Была показана несущественность влияния природы металла на чувствительность смеси к лазерному импульсному воздействию при оптимальном содержании добавки металла и близости размеров и формы частиц. Смеси были изготовлены сухим смешением. В работе [4] была исследована зависимость критической энергии лазерного импульсного инициирования для смесей тэна и нанодисперсного алюминия от концентрации включений частиц алюминия. Смеси были изготовлены ультразвуковым смешением в инертной среде, в роли которой выступал гексан.

Как известно [5], технология изготовления ВВ может влиять как на его газодинамические характеристики, так и на параметры чувствительности.

В настоящей работе проведено сравнение чувствительности к импульсному лазерному излучению смесей тэна и нанодисперсного алюминия, изготовленных по названным выше технологиям.

Объектами исследований являлись смеси тэна ( $S=5200 \text{ см}^2/\text{г}$ ) и нанодисперсного алюминия (средний размер частиц  $\sim 50\text{-}70 \text{ нм}$ ).

В работе [6] было определено, что максимальной чувствительностью обладают смеси тэна с 3-5 % по массе нанодисперсного алюминия. Для сравнения технологий будут использоваться смеси с содержанием алюминия 1, 3, 5 % по массе.

На рисунке 1 представлен внешний вид полученных смесевых ВВ.

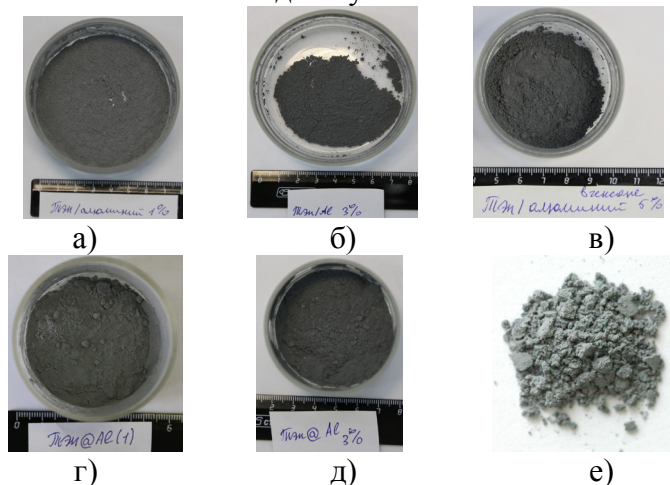


Рисунок 1 – Внешний вид смесей тэна с нанодисперсным алюминием: ультразвуковое смешение (Тэн/Al): а) – 1 % Al, б) – 3 % Al, в) – 5 % Al; сухое смешение (Тэн@Al): г) – 1 % Al, д) – 3 % Al, е) – 5 % Al

Из рисунка 1 визуально видно, что обе технологии изготовления приводят к полной гомогенизации смеси.

На рисунке 2 представлены сравнительные микрофотографии исследуемых смесей, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

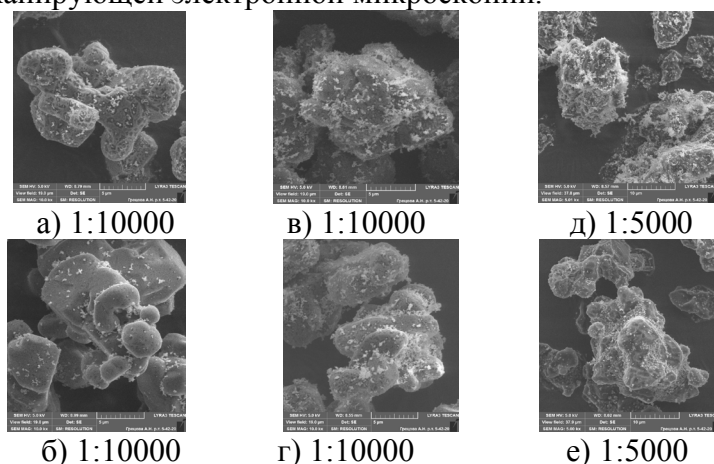


Рисунок 2 – Сравнительные микрофотографии смесей тэна и нанодисперсного алюминия, изготовленных методами сухого и ультразвукового смешения: а), б) – 1 % наноалюминия, в), г) – 3 % наноалюминия, д), е) – 5 % наноалюминия

Как видно из микрофотографий, для частиц исследуемых смесей характерна высокая дисперсность, причем более мелкие частицы алюминия распределены по поверхности более крупных частиц тэна. Распределение можно считать условно равномерным. Однако между смесями, изготовленными различными методами, наблюдается различие в распределении частиц металла на поверхности частиц ВВ. При изготовлении методом ультразвукового смешения достигается квазиравномерное покрытие частиц тэна наночастицами алюминия, в то время как при сухом смешении наблюдается образование агломераций алюминия на поверхности частиц тэна.



Для определения чувствительности смесей к лазерному излучению использовался твердотельный лазер с диодной накачкой YAG: ND<sup>3+</sup>. Длительность импульса на полувывоте  $\tau \sim 7$  нс, длина волны излучения  $\lambda = 1064$  нм, энергия в импульсе  $E \sim 100$  мДж, диаметр пучка (по уровню энергии  $1/e^2$ ) – 3,6 мм.

На рисунке 3 представлена схема постановки эксперимента.

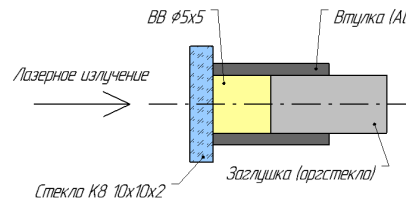


Рисунок 3 – Схема постановки эксперимента

В серии опытов определялась пороговая энергия иницирования исследуемых составов с ВВ ( $E_{0,5}$ ). Далее работа проводилась с пороговой плотностью энергии ( $W_{0,5}$ ), которая определялась из соотношения  $W_{0,5} = E_{0,5}/S$ , где  $E_{0,5}$  – пороговая энергия иницирования смеси,  $S$  – площадь лазерного пятна, воздействующего на ВВ ( $S = \pi d^2/4$ ).

На графиках рисунка 4 представлены сравнительные зависимости пороговой плотности энергии от плотности образцов для смесей с одинаковым содержанием нанодисперсного алюминия.

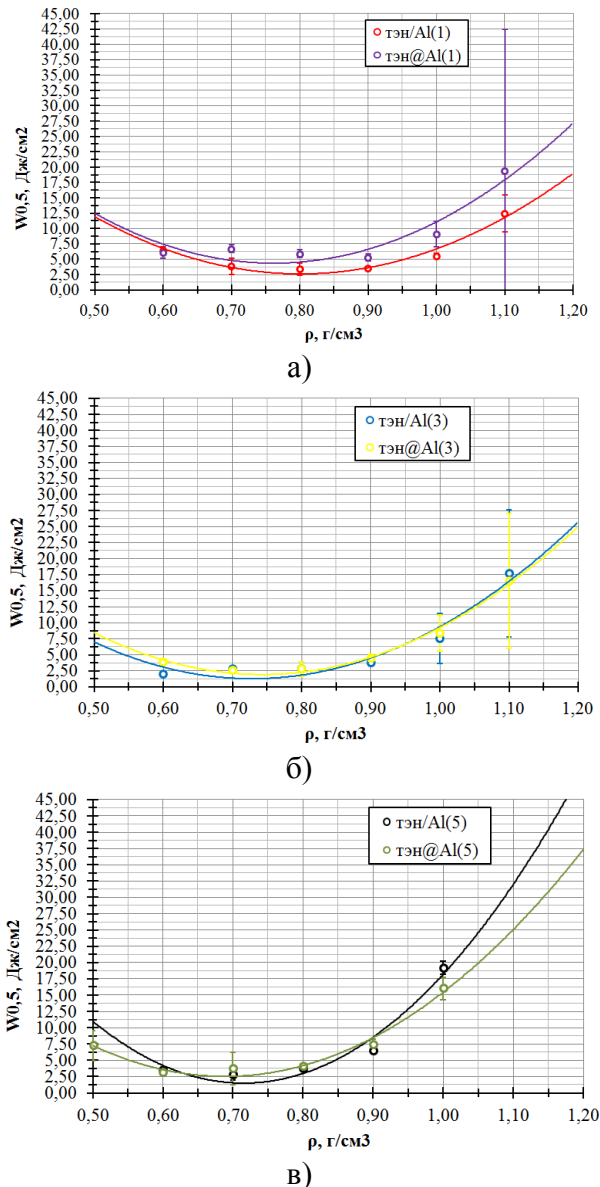


Рисунок 4 – Сравнительные зависимости чувствительностей смесей с одинаковым содержанием добавки: а) – 1 % Al, б) – 3 % Al, в) – 5 %

Зависимости плотности энергии от плотности смесей с одинаковым процентным содержанием добавки имеют близкие значения в пределах погрешности, также совпадают значения оптимальных плотностей смесей и количества добавки. Можно отметить, что технология изготовления смесей не влияет на параметры чувствительности смесей. Однако изготовление по методу сухого смешения в замкнутой электростатической системе имеет следующие достоинства: высокая интенсивность смешения, простота исполнения, отсутствие загрязнения образцов, отсутствие технологических потерь. Тем временем изготовление по методу ультразвукового смешения в инертной среде имеет плюсы: отсутствие технологических потерь и нагрева смеси в ходе ультразвукового воздействия.

В настоящей работе показано, что смеси тэна и нанодисперсного алюминия, изготовленные по технологиям: ультразвуковое смешение в инертной среде и сухое смешение в замкнутой электростатической системе, имеют идентичные пороговые характеристики смесей к импульсному лазерному излучению.

*Использованные источники:*

1. Адуев, Б.П. Светочувствительный материал на основе смеси тэна и наночастиц алюминия/ Б. П. Адуев, Г.М. Белокуров, Д. Р. Нурмухаметов, Н.В. Нелюбина // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48. – № 3. – С. 127 – 132.
2. Бриш, А.А. Возбуждение детонации конденсированных ВВ излучением оптического квантового генератора/ А.А. Бриш, И.А. Галеев, Б.Н. Зайцев, Е.А. Сбитнев, Л.В. Татаринцев // Физика горения и взрыва. – 1966. – № 3. – С. 132 – 133.
3. Бриш, А.А. Об отражательной способности ВВ/ И.А. Галеев, Б.Н. Зайцев // Физика горения и взрыва. – 1969. – Т. 5. – № 3. – С. 447.
4. Таржанов, В.И. Быстрое инициирование ВВ. Особые режимы детонации / Таржанов В.И. // Сборник научных статей. Изд. РФЯЦ – ВНИИТФ. Снежинск, 1998.
5. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.
6. Шишкин Н.Я., Глущенко А.Г., Суров М.С. Инициирование смесей тэна с нанодисперсным алюминием лазерными импульсами наносекундной длительности // Научная сессия НИЯУ МИФИ 2023 по направлению «Инновационные и ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 31 января – 2 февраля 2023., Снежинск. М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – с. 133-135.

## ДОРАБОТКА ДВИГАТЕЛЯ ТЯЖЁЛОГО МОТОЦИКЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СМЕЩЕНИЯ ПИКА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В СТОРОНУ БОЛЕЕ ВЫСОКИХ ОБОРОТОВ

Шишкин Н.Я., Паршукова Н.Ю.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

e-mail [p.i.e@yandex.ru](mailto:p.i.e@yandex.ru)

В работе проведена конструктивная доработка двигателя тяжелого мотоцикла КМЗ МТ 10-36 для повышения динамических характеристик. В результате конструктивной доработки уменьшилось время разгона на 8с и время выхода двигателя на максимальные обороты.

*Ключевые слова: двигатель, коленчатый вал, маховик, поршень, диски сцепления, головка блока цилиндров*

## MODIFICATION OF THE HEAVY MOTORCYCLE ENGINE TO INCREASE DYNAMIC CHARACTERISTICS AND SHIFT THE TORQUE PEAK TOWARDS HIGHER SPEEDS

Shishkin N. Ya., Parshukova N. Yu.

*Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University  
MEPhI*

e-mail [p.i.e@yandex.ru](mailto:p.i.e@yandex.ru)

The work carried out a constructive revision of the engine of the heavy motorcycle KMZ MT 10-36 to improve dynamic characteristics. As a result of the constructive refinement, the acceleration time was reduced by 8 seconds and the time for the engine to reach maximum rpm.

*Keywords: engine, crankshaft, flywheel, piston, clutch discs, cylinder head*

При эксплуатации тяжелых мотоциклов возникают следующие проблемы: большое время разгона, не высокая скорость передвижения по трассе, большое время выхода двигателя на максимальные обороты [1,2].

С целью устранения указанных недостатков были проведены конструктивные доработки двигателя [3]:

- изменение массы коленчатого вала (КВ) путём частичного удаления противовесов с дальнейшей балансировкой;
- изменение массы маховика путём удаления бокового борта с наружного диаметра маховика;
- изменение массы поршней путём удаления юбки поршня и второго маслосъёмного кольца;
- изменение камеры сгорания путём смещения головки блока цилиндров ближе к поршню на 2 мм (была уменьшена высота цилиндра);
- установка облегченных фрикционных и промежуточных дисков сцепления.

Изменение массы коленчатого вала произведена путём частичного удаления противовесов с дальнейшей балансировкой. Масса стандартного коленчатого вала 5800 грамм, масса доработанного 4500 грамм.

На рисунке 1 слева - вид доработанного КВ, справа - стандартного [1,2,3].

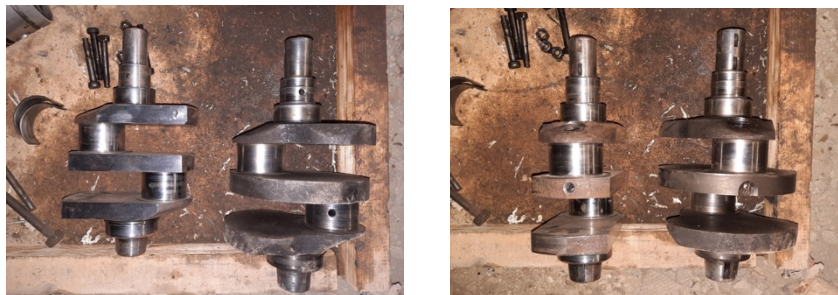


Рисунок 1 – Внешний вид доработанного и стандартного коленчатых валов под разными углами

Изменение массы маховика осуществлено путём удаления бокового борта с наружного диаметра маховика для повышения динамических характеристик.



Рисунок 2 – Внешний вид доработанного и стандартного маховиков

Снижение массы поршня достигнуто удалением юбки поршня и второго маслосъёмного кольца.



Рисунок 3 – Внешний вид стандартного и доработанного поршней

Изначально двигатель был изготовлен для эксплуатации с применением бензина с октановым числом АИ-76, АИ-80, так как данный вид топлива отсутствует на большинстве заправочных станций, двигатель был переделан под бензин АИ-92 путем уменьшения высоты цилиндра. В связи с этим была уменьшена камера сгорания и повышена степень сжатия до параметров необходимых для бензина АИ-92.

Для снижения инерционной вращающейся массы были установлены облегченные фрикционные и промежуточные диски сцепления (рис.4).

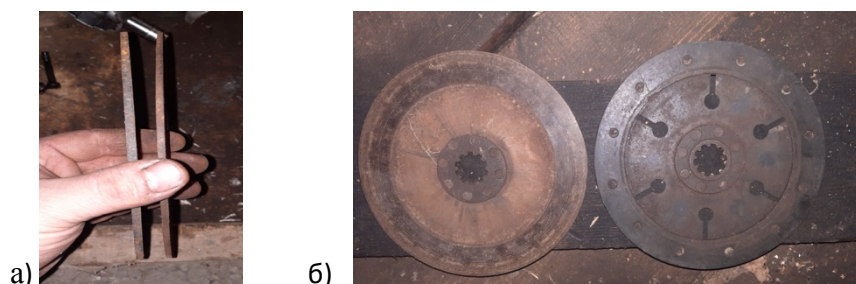


Рисунок 4 – Вид стандартного и облегченного дисков сцепления:  
а - промежуточные, б - фрикционные

Таблица – Сравнительные характеристики стандартного и доработанного ДВС

Наименование	Стандартный ДВС	Доработанный ДВС
Тип двигателя	четырёхтактный, карбюраторный, с верхним расположением клапанов, двухцилиндровый	четырёхтактный, карбюраторный, с верхним расположением клапанов, двухцилиндровый
Рабочий объем цилиндров	649 см <sup>3</sup>	649 см <sup>3</sup>
Степень сжатия	7,5–8	9,5–10
Диаметр цилиндра	78 мм	78 мм
Ход поршня	68 мм	68 мм
Макс мощность	26,5 (36) кВт (л.с.)	26,5 (36) кВт (л.с.)
Число оборотов, соответствующее максимальной мощности	5600–5900 об/мин	6500–7000 об/мин
Макс крутящий момент	47 (4,8) Н·м (кгс·м)	47 (4,8) Н·м (кгс·м)
Число оборотов, соответствующее максимальному крутящему моменту	4900–5200 об/мин	5500–6000 об/мин
Топливо	бензин АИ-76 или АИ-80	бензин АИ-92
Охлаждение	воздушное	воздушное
Максимально-возможная скорость на мотоцикле	130 км/ч	160 км/ч
Время разгона до 100 км/ч	19 сек	11 сек

После сборки двигателя и установки его на мотоцикл были проведены ходовые испытания. Замечено, что незначительно выросли максимальные обороты двигателя, также мотор стал более динамично набирать максимальные обороты без «провалов» при резком открытии дроссельной заслонки, значительно уменьшилось время разгона до 100 км/ч, и незначительно увеличилась максимальная скорость. Замечено снижение тяговых характеристик на оборотах ниже средних, но в случае, когда обороты двигателя выше средних, существенных различий не обнаружено.

Для достижения более высокой максимальной скорости, для доработанного ДВС возможна установка пяти или шести ступенчатой коробки переключения передач (КПП). Установка данной КПП была не желательна со стандартным ДВС, так как он имеет низкие максимальные обороты и не сможет разогнать на данных передачах мотоцикл.

*Использованные источники:*

1. Быков К.П., Грищенко П.В. Мотоциклы «Урал», «Днепр». Эксплуатация, ремонт. Пособие по ремонту. - Чернигов: ПФК «Ранок»; Москва, ООО «РусьАвтотекнига» 2001
2. Котов П. Н., Капустин А. А. К73 Ремонт Тяжелых мотоциклов. - Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986
3. Подольский М.С. Методические указания по дисциплине «Конструкция и настройка спортивных автомобилей». - Москва: МАДИ, 2014



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В СОСТАВЕ ПРОГРАММНО- ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ВОЛНА»

Абраменко<sup>1,2</sup> И.А., Анучин<sup>2</sup> М.Г.,  
Кузнецов<sup>2</sup> А.Н., Новаковский<sup>2</sup> Н.С.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

В докладе сформулированы уравнения, описывающие работу кранов-регуляторов, а также представлены: 1. Необходимые алгоритмы расчёта регуляторов давления газа. 2. Результаты сравнения расчётных данных с экспериментальными. 3. Результаты тестовых расчётов и расчётов реальных газотранспортных систем. Изложенные результаты расчетов подтверждают работоспособность и удовлетворительность точности полученной модели.

*Ключевые слова: модель крана-регулятора, моделирование газотранспортных систем, природный газ, трубопровод, программный комплекс «волна».*

## A MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROL VALVES OF MAIN GAS PIPELINES AS PART OF THE VOLNA SOFTWARE AND COMPUTING COMPLEX

Abramenko 1,2 I.A., Anuchin2 M.G., Kuznetsov2 A.N., Novakovskiy2 N.S.

*IFGBOU VO "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research  
Nuclear University MEPHI", Snezhinsk, Chelyabinsk region.*

*2FGUP RFYATS-VNIITF named after Academician E.I. Zababakhina", Snezhinsk,  
Chelyabinsk region.*

The report formulates equations describing the operation of control valves, and also presents: 1. Necessary algorithms for calculating gas pressure regulators. 2. The results of comparing the calculated data with the experimental ones. 3. The results of test calculations and calculations of real gas transmission systems. The presented calculation results confirm the operability and satisfactory accuracy of the obtained model.

*Keywords: model of a crane regulator, modeling of gas transmission systems, natural gas, pipeline, software package "volna".*

Газовая промышленность – это одна из лидирующих отраслей экономики России. Одной из важнейших подотраслей является газопроводный транспорт. Увеличение протяженности магистральных газопроводов, их разветвлённость, обуславливающая охват газопотреблением большей части территории России, значительное число взаимосвязанных объектов, включенных в газотранспортную систему (ГТС), говорит о том, что развитие и продвижение программно-вычислительных комплексов в составе систем оперативно-диспетчерского управления (СОДУ) и поддержки принятия решений (СППР), крайне необходимо. В настоящее время из подобных отечественных ПВК наиболее перспективным является ПВК «Волна».

ПВК «Волна» предназначен для проведения расчетов текущих режимов транспортировки газа в реальном времени с использованием контролируемых параметров процесса; расчетного прогнозирования по заданному сценарию управляющих воздействий диспетчера, включая аварийные ситуации с разрывом газопровода; оптимизации режимов функционирования ГТС.



ПВК «Волна» активно используется в повседневной работе производственно-диспетчерских служб газотранспортных предприятий ПАО «Газпром». Такое активное использование влечет за собой потребность в улучшении методик расчета отдельных составляющих ГТС.

Работа посвящена разработке и реализации методики расчёта крана-регулятора в программном комплексе моделирования газотранспортных систем «Волна».

В докладе сформулированы уравнения, описывающие работу кранов-регуляторов, а также представлены: 1. Необходимые алгоритмы расчёта регуляторов давления газа, 2. Результаты сравнения расчётных данных с экспериментальными, 3. Результаты тестовых расчётов и расчётов реальных газотранспортных систем.

Изложенные результаты расчетов позволяют сделать вывод о работоспособности и удовлетворительной точности полученной модели.

В рамках настоящей работы при помощи разработанной методики выполнен расчет производственной задачи Хабаровской РГС по заданию ПДС «Газпром трансгаз Томск». Результаты, изложенные в работе, могут быть использованы как рекомендация для диспетчера ГТС, позволяющие получить заданные характеристики управляемой системы.

*Использованные источники:*

1. Анучин М.Г., Дремов В.В. Модель для расчета течения природного газа по линейному участку магистрального газопровода. Отчет РФЯЦ-ВНИИТФ, инв. № ПС.99.7432, Снежинск, 1999 г.
2. Трубопроводные системы энергетики. Развитие теории и методов математического моделирования и оптимизации / Ред. Аверьянов В.К., Новицкий М.Г., Сухарев М.Г. и др. - Новосибирск: Наука, 2008. - 312 с.
3. Анучин Макс.Г., Анучин Мих.Г., Воробьев А.А., Калинин А.А., Каспиев Г.В., Кузнецов А.Н., Юшманов А.Я., Яковлев А.Я. Методика расчета течения природного газа по трубе в программном комплексе моделирования газотранспортных систем «Волна». // Математическое моделирование. 2014 год. Том 26, № 7. С. 7-96.
4. Моквельд: официальный сайт – Нидерланды, 2021. – URL: <https://mokveld.com/ru/Клапаны-осевого-типа-Mokveld> (дата обращения: 01.03.2023).
5. Корельштейн Л.Б. Существование, единственность и монотонность решения задачи потокораспределения в гидравлических цепях с зависящими от давления замыкающими соотношениями. Труды XVIII Всеросс. научн. семин. «Математические модели, и методы анализа, и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Алтай, 12 – 18 сентября 2022 г. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2022. – 477 с.
6. М.Г. Анучин, А.В. Вронский, С.В. Гагарин (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»), В.Н. Вишняков, В.П. Желанов, С.Ю. Волков (ООО «Севергазпром»). Программный комплекс «АГАТ-OnLine»: расчет в реальном времени рабочих режимов центробежных нагнетателей. Газовая промышленность. №1, 2006, стр.25-27.
7. Анучин Макс.Г., Анучин Мих.Г., Кузнецов А.Н. Применение метода глобального градиента и метода контурных расходов для расчета стационарных режимов газотранспортных систем в программном комплексе «Волна». Отчет ФГУП «РФЯЦВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», инв. №ПС22.16098.
8. Анучин Макс.Г., Анучин Мих.Г., А.Н. Кузнецов. Особенности применения метода глобального градиента для моделирования стационарных режимов газотранспортных систем в программно-вычислительном комплексе «Волна». Труды XVIII Всеросс. научн. семин. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза 62 развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Алтай, 12 – 18 сентября 2022 г. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2022. – 477 с.
9. ГОСТ 24856-2014 Арматура трубопроводная. Термины и определения (с Поправкой): дата издания 24.09.2020 / Росстандарт. – Официальное издание. Москва: Стандартинформ, 2020. – 87 с.

10. Ионин А.А. Газоснабжение: учебник для студентов вузов по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция»/В.А. Жила, В.В. Артихович, М.Г. Пшоник. – Москва: Изд-во АСВ, 2013. – 472 с.
11. Миркин А.З., Усиныш В.В. Трубопроводные системы: Справочное издание. - Москва, Химия, 1991, 366 с.
12. Анучин Макс. Г., Анучин Мих. Г., Кузнецов А.Н. Уравнения состояния природного газа в программном комплексе моделирования газотранспортных систем. Отчет ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина». Инв. № ПС.18.14890/4. 62 с.
13. Волошиновский К.И. Датчики температуры, используемые в промышленном учете природного метана, поставляемого по газопроводам или каптируемого из угольных пластов // ГИАБ. 2012. №4.
14. СТО Газпром 5.32–2009 «Обеспечение единства измерений. Организация природного газа»
15. М.Г. Анучин, А.В. Вронский, С.В. Гагарин. Комплекс моделирования «АГАТ». Модель компрессорного цеха. Материалы 1-й Международной научно-технической конференции «Развитие компьютерных комплексов моделирования и оптимизации режимов работы систем газоснабжения и их роль в диспетчерском управлении технологическими процессами в газовой отрасли». Москва, 2004 г, том 2, стр.144-156.
16. Анучин Макс. Г., Анучин Мих. Г., Кузнецов А.Н. Методика моделирования разномасштабных элементов в газотранспортной системе. Отчет ФГУП РФЯЦ - ВНИИТФ, инв. № ПС.11.12406/4, Снежинск, 2011 г.
17. Анучин Макс.Г., Анучин Мих.Г., Воробьев А.А., Калинин А.А., Каспиев Г.В., Кузнецов А.Н., Юшманов А.Я., Яковлев А.Я. Методика расчета течения природного газа по трубе в программном комплексе моделирования газотранспортных систем «Волна». // Математическое моделирование. 2014 год. Том 26, № 7. С. 87 - 96.
18. Анучин Макс.Г., Анучин Мих.Г., Кузнецов А.Н. Тепловой этап в методике стационарного гидравлического расчета газотранспортных систем. Отчет ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», инв. №ПС23.16427/4. 63.
19. Н.Н. Калиткин. Численные методы. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М., 1978, 512 стр.]
20. Харари, Фрэнк. Теория графов / Перевод с англ. В.П. Козырева под ред. Г.П. Гаврилова. - Москва: Мир, 1973. - 300 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ В ЭКСТРАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

Алтынникова У.Ф.<sup>1,2</sup>, Мастюк Д.А.<sup>1,3</sup>, Ганеева Д.Ф.<sup>1</sup>

1. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.
2. ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.
3. ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Челябинская обл.  
[altynnikovauf@vniitf.ru](mailto:altynnikovauf@vniitf.ru)

В работе представлены результаты трехмерного гидродинамического моделирования камеры смешения и камеры разделения центробежного экстрактора, который в настоящее время разрабатывается для технологических схем переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Расчеты проводились при помощи открыто распространяемого программного комплекса OpenFoam и решателя multiPhaseEulerFoam, который основан на методе Эйлера и предназначен для моделирования многофазных потоков. В результате работы была проведена оценка влияния геометрических параметров аппарата и режимов проведения процессов на работу центробежного экстрактора.

*Переработка отработавшего ядерного топлива, экстракция, центробежный экстрактор, OpenFOAM, численное моделирование.*

## MULTIPHASE SYSTEM SIMULATION IN AN EXTRACTION PROCESS OF THE SPENT NUCLEAR FUEL REPROCESSING

Altynnikova U.F.<sup>1,2</sup>, Mastuk D.A.<sup>1,3</sup>, Ganeeva D.F.<sup>1</sup>

1. FSUE «RFNC - VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin»
2. FSAEI HE «Snezensk physicotchnical institution of national research nuclear university МЕРНI»
3. FSAEI HE «South - Ural state-run university (NRU)»  
[altynnikovauf@vniitf.ru](mailto:altynnikovauf@vniitf.ru)

The paper presents hydrodynamic three-dimensional simulation results of the mixture chamber and the separation chamber of a centrifugal extractor, which is currently being developed for technological schemes of a spent nuclear fuel reprocessing. Calculations were carried out using openly source software package OpenFoam and multiPhaseEulerFoam solver based on Euler's method and meant for multiphase flow simulation are made. As a result, the influence of configuration and operating conditions of the device on the efficiency of the centrifugal extractor was evaluated.

*Spent nuclear fuel reprocessing, extraction, centrifugal extractor, OpenFOAM, numerical simulation.*

В основе существующих технологических схем переработки отработанного ядерного топлива лежат экстракционные процессы. Экстракция – процесс разделения смеси жидких или твердых веществ с помощью избирательных растворителей (экстрагентов). Центробежный экстрактор в соответствии с протекающими процессами может быть разделен на две зоны: камеру смешения, в которой осуществляется контакт двух фаз для перехода ключевого компонента и камеру разделения, в которой происходит разделение фаз под действием центробежной силы. На рисунке 1 приведено схематическое представление экстракционного каскада.

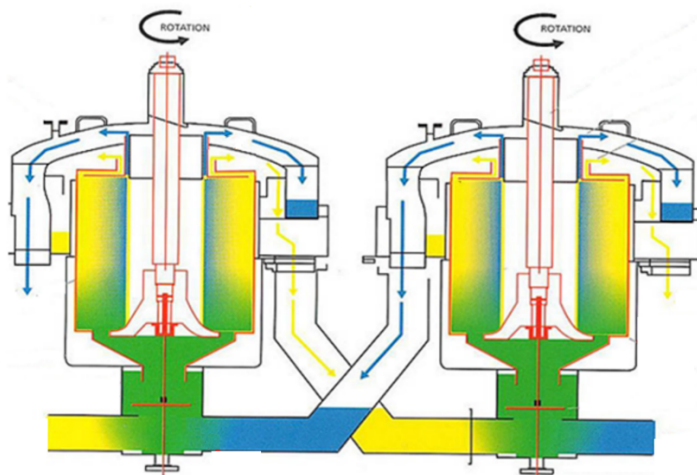


Рисунок 1 – Схематическое представление работы каскада центробежных экстракторов

Исходный раствор и несмешиваемый экстрагент подаются в камеру смешения. Исходным раствором является водный раствор азотной кислоты (водная фаза), с растворенным в нем целевыми компонентами ОЯТ, экстрагент – раствор трибутилфосфата (ТБФ) в додекане (легкая фаза). Вместе с исходным раствором в экстрактор подается нерастворенный осадок (тяжелая фаза). В камере смешения потоки перемешиваются до состояния эмульсии. В результате площадь поверхности контакта двух фаз возрастает, что способствует интенсификации массообмена между фазами (целевой компонент переходит через границу раздела фаз). Полученная смесь подается в камеру разделения, где под действием центробежной силы происходит разделение на легкую фазу и тяжелую фазу. После чего фазы выводятся из экстрактора самотеком в следующий экстрактор или в приемник.

Ранее в работе [1] была предложена гидродинамическая модель, позволяющая моделировать процесс массообмена между растворами через границу раздела фаз и учитывать изменения плотностей фаз. В рамках данной работы наибольший интерес представляет нахождение застойных зон, где происходит накопление нерастворенного осадка (твердой фазы) и нахождения оптимального режима работы экстрактора, при котором образование застойных зон не происходит.

Трехмерные многофазные гидродинамические расчеты проводились с помощью решателя multiPhaseEulerFoam [2] программного пакета OpenFOAM [3]. Решатель multiPhaseEulerFoam основанный на методе Эйлера для многофазных течений предназначен для моделирования многофазных многоскоростных систем, состоящих из несжимаемых изотермических несмешивающихся жидкостей. В методе Эйлера различные фазы математически описываются как взаимопроникающие континуумы. При этом дискретные частицы рассматриваются как отдельная сплошная фаза, учитывающая такие физические характеристики как: распределение размеров частиц, показатель не сферичности частиц [4]. В данном подходе в каждом дискретном элементе сетки определяется объемная доля каждой фазы. Таким образом решатель позволяет моделировать различные типы взаимодействия между фазами, такие как: образование суспензии и эмульсии.

Для упрощения расчетов моделирование центробежного экстрактора было разделено на две части: моделирование работы камеры смешения и моделирование работы камеры разделения. Расчетные сетки были построены с помощью программного комплекса Salome [5] и была проведена проверка на сеточную сходимость.

В результате расчетов камеры смешения были получены скорость и направление движения каждой фазы, распределение фаз в каждой ячейке расчетной сетки в зависимости от режимов работы. Наилучший результат с точки зрения сохранения водно-органического соотношения и минимизации застойных зон в камере смешения показал базовый (штатный) режим работы экстрактора. Накопление частиц твердой фазы происходит в узких участках конструкции, как показано на рисунке 2.

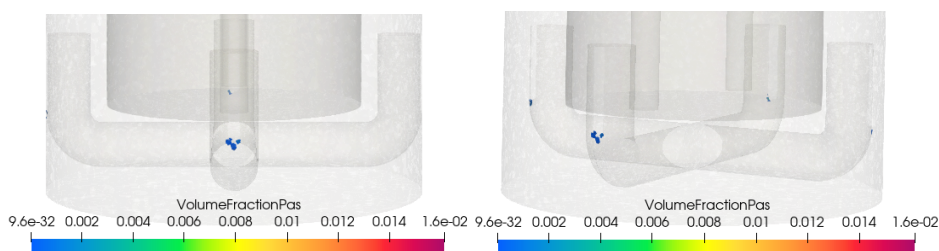


Рисунок 2 – Ячейки с наибольшей объемной долей твердой фаз вид с разных углов поворота камеры смешения

Для камеры разделения был рассмотрен базовый режим работы для трех различных геометрий. Были получены скорость и направление движения каждой фазы, распределение фаз в каждой ячейке расчетной сетки. Результаты расчета показывают, что основное накопление нерастворенного осадка находится в узкой части конструкции, в месте где крышка примыкает к корпусу ротора. Минимальное накопление частиц наблюдается в камере разделения в конфигурации представленной на рисунке 3, а). Наибольшее накопление частиц наблюдается в камере разделения представленной последней, рисунок 3, в).

Для анализа адекватности полученных результатов требуется верификация расчетной модели на экспериментальных данных.

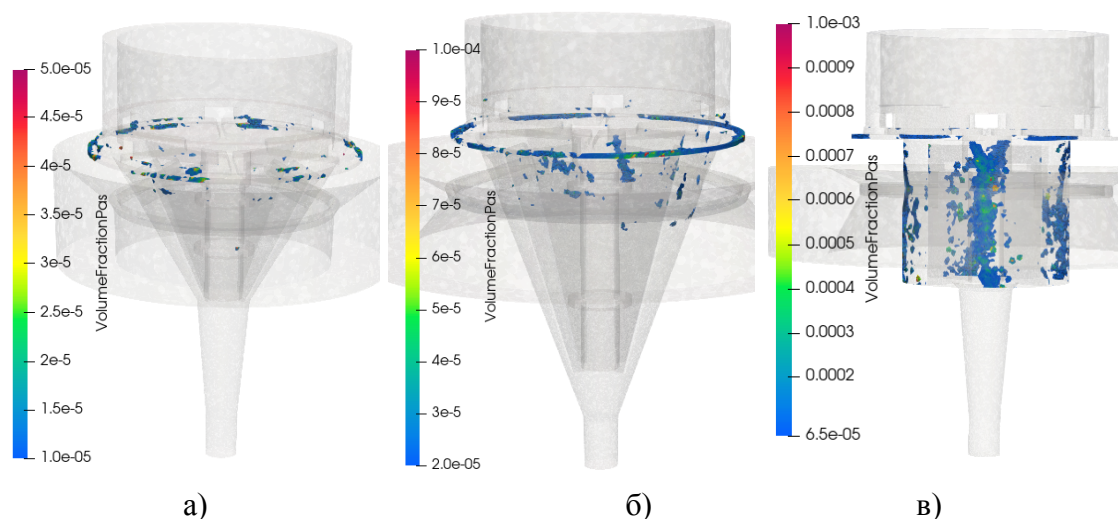


Рисунок 3 – Ячейки с наибольшей объемной долей твердой фаз для трех различных конфигураций камеры смешения

#### Использованные источники

1. Алтынникова У.Ф., Бочкарева А.А., Макеева И.Р., [и др.]. Разработка гидродинамической модели камеры смешения центробежного экстрактора // Химическая технология. – 2022. – Т. 23, №5. – С.232-240.
2. Surya Kaundinya Oruganti, Implementation of cavitation models into the multiphaseEulerFoam solver. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/327692025>.
3. [Электронный ресурс]. – <http://www.OpenFOAM.org>.
4. Л.В.Быков, А.М. Молчанов, Д.С. Янышев, Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики, Учебное пособие Издание второе, исправленное и дополненное.
5. [Электронный ресурс]. – <http://www.salome-platform.org>.



## **РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКСИАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР В ТВЭЛ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

Бабак Д.В., Ефимов-Сойни Н.К.  
*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
Санкт-Петербург*

### **Аннотация**

Цель исследования – разработка и валидация модельной задачи для достижения требуемого уровня адекватности гидрогазодинамической модели для расчета аксиального распределения температур в имитаторах ТВЭЛ. В статье представлены результаты валидации цифровой модели через виртуальный испытательный стенд с использованием большого количества экспериментальных данных. Научная новизна заключается в реализации полного цикла работ по созданию моделей стенда по технологии цифровых двойников [1] для задач обоснования теплотехнической надежности и безопасности водоохлаждаемых реакторов. В данной работе для подготовки геометрии используется ПО SolidWorks, валидация расчетной модели осуществлена в ПО Ansys CFX 19R3, обработка полученных данных произведена в Ansys CFD Post. Все расчетные случаи посчитаны и проанализированы в среде цифровой платформы CML-Bench®.

*Ключевые слова: ТВЭЛ, ТВС, виртуальный испытательный стенд, валидация, численное моделирование, цифровой двойник, цифровая модель.*

## **DEVELOPMENT OF A VIRTUAL TEST BENCH FOR THE DISTRIBUTION OF AXIAL TEMPERATURES IN FUEL RODS FOR THE VALIDATION OF DIGITAL MODELS**

Babak D.V., Efimov-Soini N. K.  
*St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, St. Petersburg*

**Annotation** The purpose of the study is to develop and validate a model problem to achieve the required level of adequacy of the hydrogasdynamic model for calculating the axial temperature distribution in fuel element simulators. The article presents the results of validation of a digital model through a virtual test bench using a large amount of experimental data. The scientific novelty lies in the implementation of a full cycle of work on the creation of stand models using digital twins technology [1] for the tasks of substantiating the thermal reliability and safety of water-cooled reactors. In this work, SolidWorks software is used to prepare the geometry, validation of the calculation model is carried out in Ansys CFX 19R3 software, processing of the obtained data is performed in Ansys CFD Post. All calculated cases are calculated and analyzed in the environment of the CML-Bench digital platform.

*Keywords: TVEL, fuel assemblies, virtual test bench, validation, numerical modeling, digital twin, digital model.*

### **Введение**

В связи с постоянным повышением требований к точности расчетных кодов, используемых для обоснования теплотехнической надежности и безопасности водоохлаждаемых реакторов, требуется расширение базы экспериментальных данных для верификации кодов. Наряду с данными по гидравлическому сопротивлению и кризису теплоотдачи, при оценке выбранного ПО и используемого математического кода требуется подтверждение точности расчета коэффициентов теплоотдачи в активной зоне реакторов с



использованием экспериментальных данных, полученных при представительном моделировании режимных параметров и геометрических характеристик топливных сборок. [8]

Данная информация является актуальной как для ячейковых теплофизических кодов, основная цель которых получение детального распределения по активной зоне таких параметров, как температуры оболочек ТВЭЛ, относительная энтальпия и величина запаса до кризиса теплоотдачи, так и для контурных кодов, активные зоны в которых могут моделироваться «горячим каналом».

В коммерческих программах конечно-элементного анализа в качестве одного из основных замыкающих соотношений выступает модель теплоотдачи. От точности определения коэффициента теплоотдачи при различном режиме течения теплоносителя в расчетной области зависят такие важные параметры, как температура оболочки ТВЭЛ (приемочный критерий) и энтальпия теплоносителя в ячейке (канале), которая, в свою очередь, является одной из ключевых значений при определении величины критического теплового потока (приемочный критерий) [5].

Целью работы является разработка и валидация модельной задачи для достижения требуемого уровня адекватности гидрогазодинамической модели для расчета аксиального распределения температур в имитаторах ТВЭЛ.

В связи с этим, актуальной становится задача получения как можно большего массива экспериментальных данных по температурам оболочек ТВЭЛ, измеренных в широком диапазоне режимных параметров теплоносителя при течении его в геометрии, которая максимально приближена к реальной тепловыделяющей сборке ядерного реактора [8]. Такие данные можно получить, выполняя эксперименты на многостержневой электрообогреваемой модели ТВС, оснащенной необходимыми дистанционирующими решетками (ДР) – штатными ДР или решетками интенсификаторами. Данные, полученные на экспериментальном стенде в условиях, покрывающих эксплуатационные условия тепловыделяющих сборок в современных реакторах ВВЭР, могут быть использованы для валидации теплофизических расчетных кодов, как ячейковых, так и контурных [8].

Для получения экспериментальных данных по теплоотдаче при оснащении ТВС только штатными ДР на стенде были проведены несколько серий экспериментов на 19-стержневой модели топливной сборки ТВС-2М. Стенд оснащен термопарными зондами, измеряющими температуру внутри имитаторов ТВЭЛ, получаемые данные эксперимента необходимы для валидации модельной задачи.

#### **Виртуальный испытательный стенд**

Моделирование полномасштабной сборки в виртуальном испытательном стенде (ВИС) нецелесообразно ввиду того, что для определения аксиального распределения температур в имитаторах ТВЭЛ необходим участок геометрии, ограниченный плоскостями, которые соответствуют местам врезке патрубков входа и выхода теплоносителя. На рисунке 1 (а) представлена исходная геометрия и упрощенная геометрия в рамках задачи.

САД модель состоит из 20-ти доменов, из которых один домен жидкостной и 19 доменов твердотельные. Жидкостной домен соответствует зоне движения теплоносителя (вода). Твердотельные домены соответствуют имитаторам ТВЭЛ.

Для создания оптимальной сеточной модели геометрия разделена на зоны с ПР и зоны без ПР. Такое разделение позволяет использовать разные сеточные элементы, в большей степени отвечающее геометрическим особенностям [2]. Зоны с ПР заполнены тетраэлементами ввиду наличия относительно сложной геометрии, зоны без ПР не имеет ограничений для применения гексагональных элементов, которые значительно сокращают ресурсоемкость расчета [3].

Для анализа выбраны 9 расчетных случаев из 176 по принципу максимально отличающихся условий и наличию теплового потока на имитаторах. На рисунке 1 (б) представлены граничные условия для серии экспериментов, где на вход задается массовый расход теплоносителя (Mass Flow Inlet) и температура, на тепловыделяющей части пучка задан

тепловой поток (Heat Flux), на выходе задано полное давление (Pressure Outlet), согласно постановке выбранных расчетных случаях. Используемая модель турбулентности – SST [4].

При формировании матрицы экспериментов для каждого расчетного случая по исходным данным температуры на входе и давлению на выходе вычисляются свойства теплоносителя, которые используются в расчете [6]. Для вычисления свойств используется программа Water Steam Pro.

В процесс решения после 50-й итерации наблюдается выход на плато значений основных уравнений, значения по дисбалансам выходят на плато после 85-ти итераций, что определяет необходимое число итераций для каждого случая [3]. Проверка сеточной сходимости проведена по результатам средней температуры теплоносителя на выходе в 159-м расчетном случае, которая составляет 317 °С. По результатам, представленных в таблице 1 выбрана дискретность сеточной модели с основным элементом в ядре 0.5 мм.

Для получения и обработки результатов ВИС используются модели температурных зондов, расположенные на контрольных плоскостях, определяющих аксиальную координату. Модели имитируют зондовые термопары в экспериментальном стенде, установленные внутри имитаторов (рис. 2). Контрольные плоскости снятия температур с имитаторов, как и термопары в эксперименте, расположены на расстоянии 55, 400, 740, 1080, 1420, 1760, 2100, 2440 мм от верхней границы зоны тепловыделения.

Ввиду отсутствия данных по конкретным координатам контрольных точек, вместо точечного измерения температуры внутри имитаторов, температура считается как среднее по сечению.

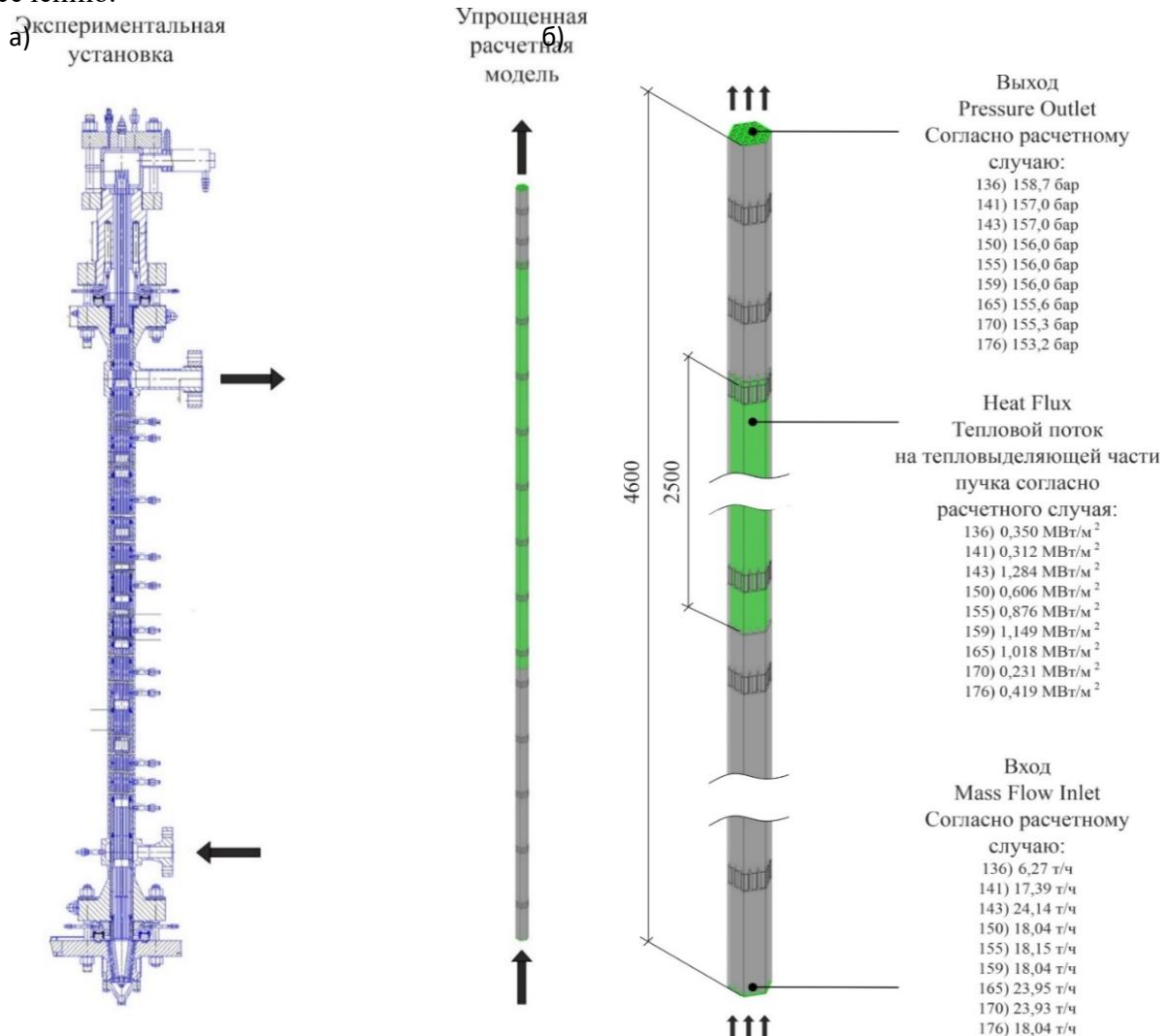


Рис. 1. а) Исходная и упрощенная геометрия; б) Граничные условия для серии экспериментов

Табл. 1. Проверка сеточной сходимости

No	Дискретность, мм	Количество элементов	Показатель, °С
1	0.6	119056560	306.87
2	0.5	172064353	311.35
3	0.4	269500524	310.91
4	0.3	520542311	311.54

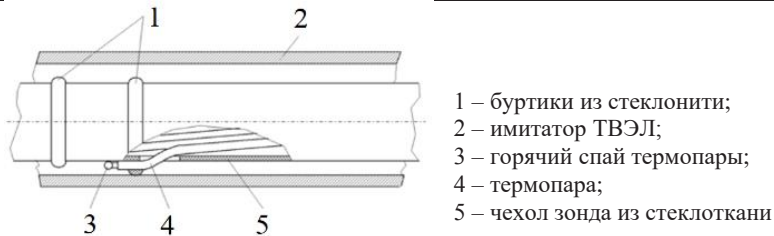


Рис. 2. Зондовая термопара

**Результаты**

Для анализа результатов построены графики распределения погрешностей по контрольным плоскостям для исследуемых расчетных случаев. Максимальная погрешность соответствует случаю 136 и не превышает 4.5%. Характер распределения примечателен тем, что у контрольной плоскости на аксиальной координате 55 мм, наблюдается рост погрешности у большинства расчетных случаев. Это связано с более интенсивным прогревом и определяет чувствительность модели к увеличению температуры [7].

Для оценки чувствительности модели к рассматриваемым режимам построены графики средних погрешностей по расчетным случаям, представленные на рисунке 3. Максимальная погрешность соответствует расчетному случаю 143 и не превышает 2.5%. Из этого следует вывод, что модель малочувствительна к изменению условий эксперимента.

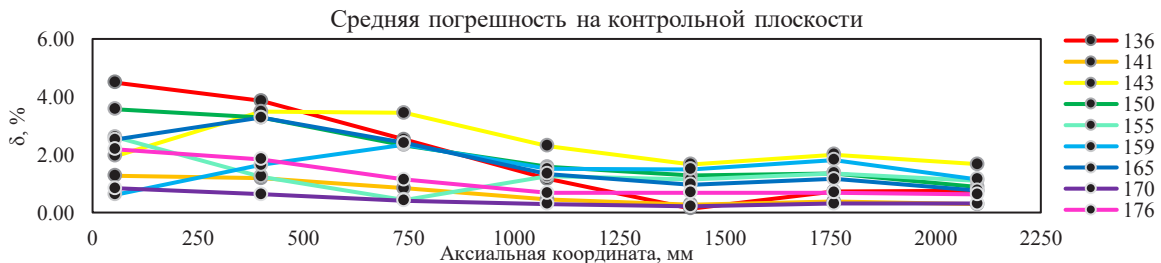


Рис. 3. Распределение погрешностей по контрольным плоскостям

На рисунке 4 также представлено значение средней погрешности расчетных случаев. Погрешность составляет 1.46%, что свидетельствует о применимости расчетного ПО и модели для определения аксиального распределения температур в имитаторах ТВЭЛ.



Рис. 4. Значения средней погрешности расчетных случаев и значение средней погрешности по расчетным случаям

*Использованные источники:*

1. Национальный стандарт Российской Федерации 57700.37–2021. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения».
2. ANSYS CFX Modelling Guide. – ANSYS Inc.
3. ANSYS CFX Theory Guide. ANSYS Inc.
4. Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А. Расчетное исследование эффективности перемешивающих решеток в области направляющего канала ТВС-Квадрат с использованием программы ANSYS CFX. – Энергетические системы и комплексы.
5. Основы конвективного теплообмена в каналах: Учеб. пособие / Г. А. Дрейцер; Моск. авиац. ин-т им. Серго Орджоникидзе. - Москва: Изд-во МАИ.
6. Numerical Computation of Heat Transfer Enhancement of a PWR Rod Bundle with Mixing Vane Spacers. Wang-Kee In. Tae-Hyun Chun. 2008. DOI: 10.13182/NT08-A3914.
7. Computational Fluid Dynamics Benchmark of High Fidelity Rod Bundle Experiments Industry Round Robin Phase 1 – Rod Bundle with Simple Support Grids.
8. Benchmarking of computational fluid dynamics codes for fuel assembly design, international atomic energy agency vienna, 2020

## АЛГОРИТМ ДВУМЕРНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ В ФОРМАЛИЗМЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Балашов Н.М.<sup>1</sup>, Майер А.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл. <sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск, Челябинская обл.  
[nikita184@yandex.ru](mailto:nikita184@yandex.ru)

Двумерная дислокационная динамика позволяет оценить напряжения течения для областей материала, содержащих десятки тысяч дислокаций, на основе уравнений, описывающих движение единичных дислокаций и их взаимодействие с включениями упрочняющих фаз. В данной работе алгоритм двумерной дислокационной динамики обобщен на случай конечных деформаций. Представлены результаты расчетов напряжения течения для чистого алюминия в зависимости от скорости деформации и плотности дислокаций.

*Ключевые слова:* Численное моделирование, дискретная дислокационная динамика, пластические деформации, метод конечных деформаций.

## ALGORITHM OF TWO-DIMENSIONAL DISCRETE DISLOCATION DYNAMICS IN THE FORMALISM OF FINITE DEFORMATIONS

Balashov N.M.<sup>1</sup>, Mayer A.E.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Snezhinsk Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University MEPHI, Snezhinsk, Chelyabinsk region  
<sup>2</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Chelyabinsk region  
[nikita184@yandex.ru](mailto:nikita184@yandex.ru)

Two-dimensional dislocation dynamics allows one to estimate flow stresses for regions of a material containing tens of thousands of dislocations based on equations that describe the motion of single dislocations and their interaction with precipitates of strengthening phases. In this work, the algorithm for two-dimensional dislocation dynamics is generalized to the case of finite deformations. The results of calculations of flow stress for pure aluminum are presented depending on the strain rate and dislocation density.

*Key words:* Numerical modeling, discrete dislocation dynamics, plastic deformations, finite deformation method.

Движение и взаимодействие дислокаций является основным процессом пластического течения металлов, которое компенсирует возникающие в нем при деформации сдвиговые напряжения. Движение единичных дислокаций и их взаимодействие с упрочняющими включениями в сплавах может быть эффективно исследовано методом молекулярной динамики [1]. Для переноса полученной информации с атомистического уровня на макроскопический может быть использован подход двумерной дислокационной динамики [1], который позволяет описывать усредненную реакцию объемов материала, содержащих десятки тысяч дислокаций. Ранее этот метод был сформулирован в приближении бесконечно малых деформаций. В данной работе проведено обобщение алгоритма двумерной дислокационной динамики на случай конечных деформаций. Для этого тензор градиентов деформации [2] мультипликативно разделяется [3] на пластическую и упругую части. Эволюция пластической части зависит от движения дислокаций в системе, а упругая часть определяет напряжения в системе. Скорость дислокаций в чистом металле рассчитывается по аналитической формуле [4].

При помощи разработанного алгоритма проводится численное моделирование процесса деформации и динамики дислокаций, чтобы определить зависимость между плотностью дислокаций и скоростью деформации, которую они могут скомпенсировать. Моделируется квадратная область со стороной 15 мкм. Область аппроксимируется сеткой  $50 \times 50$  ячеек. На границах заданы периодические граничные условия. В начальный момент времени во всех узлах задан вектор скорости  $\vec{v} = (\dot{\epsilon} * y_{node})$ , где  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации,  $y_{node}$  – высота ячейки. Скорость узлов на границе остается постоянной в ходе всего моделирования. В области распределены дислокации по равномерному закону. Для каждой дислокации случайным образом задано направление вектора Бюргерса. В начальный момент времени дислокации имеют нулевую скорость. Моделирование проводилось до  $4.73 \times 10^{-1}$  нс с постоянным временным шагом. Результаты моделирования представлены на рисунках 1 и 2. Анализируя результаты моделирования для двух различных плотностей дислокаций (рис. 1 и 2), можно отметить, чем больше плотность дислокаций, тем большие деформации можно скомпенсировать и процесс компенсации происходит быстрее.

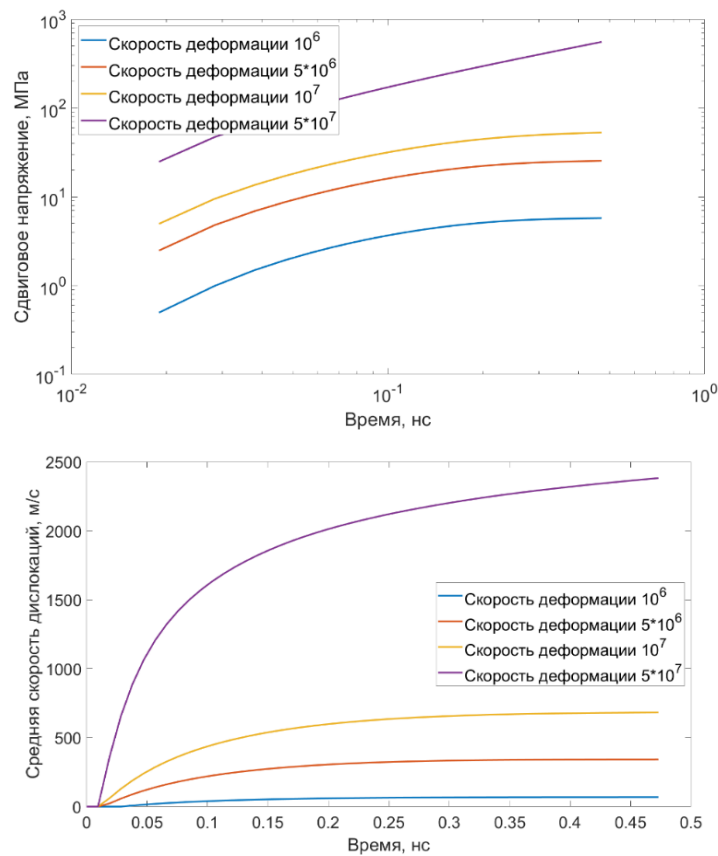


Рисунок 1. Зависимость сдвигового напряжения (сверху) и средней скорости дислокаций (снизу) от времени для различных скоростей деформаций при плотности дислокаций  $10^{14} \text{ м}^{-2}$ .



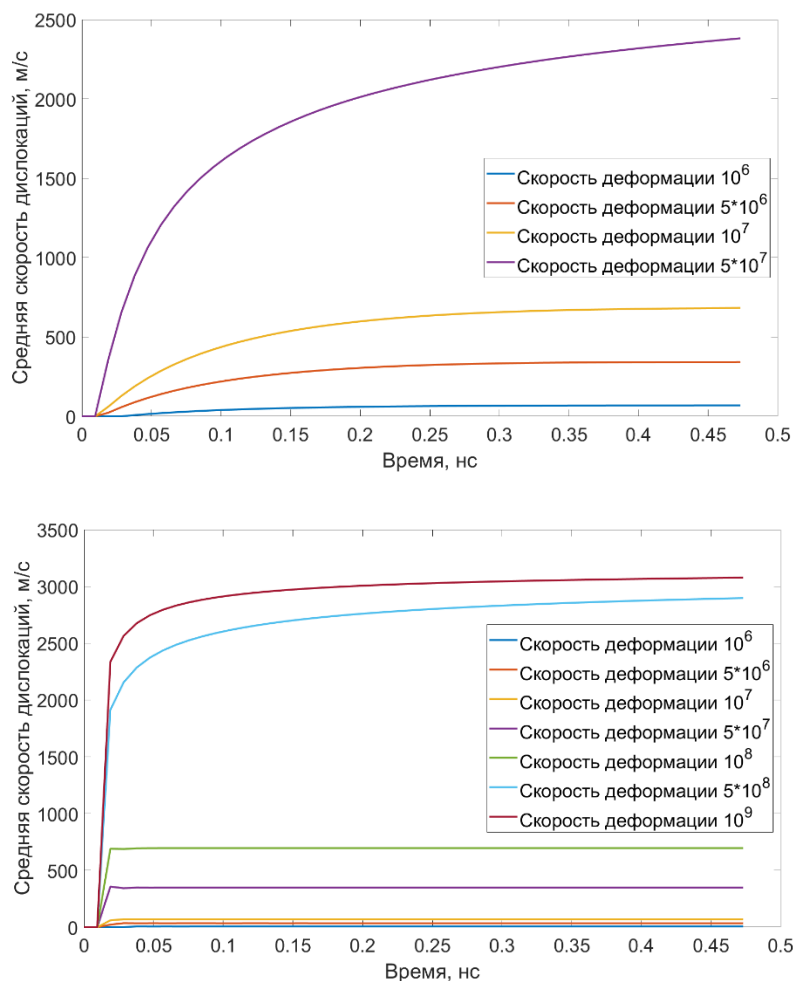


Рисунок 2. Зависимость сдвигового напряжения (сверху) и средней скорости дислокаций (снизу) от времени для различных скоростей деформаций при плотности дислокаций  $10^{15} \text{ м}^{-2}$ .

*Использованные источники:*

1. Krasnikov V.S., Mayer A.E., Pogorelko V.V. Prediction of the shear strength of aluminum with  $\theta$  phase inclusions based on precipitate statistics, dislocation and molecular dynamics. International Journal of Plasticity, 2020, 128, 102672.
2. George E. Mase Theory and Problems of Continuum Mechanics
3. Mayer A.E., Lekanov M.V., Grachyova, N.A., Fomin, E.V. Machine-learning-based model of elastic-plastic deformation of copper for application to shock wave problem. Metals 2022, 12, 402
4. Khishchenko K.V., Mayer A.E. High- and low-entropy layers in solid behind shock and ramp compression waves. International Journal of Mechanical Sciences 2021, 189, 105971.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТАНТНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УРАНА-238 НА ОСНОВНЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1200

Баранчикова А.О.<sup>1</sup>, Исанов К.А.<sup>1</sup>, Мантуров Г.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИАТЭ НИУЯ МИФИ, г. Обнинск, Россия

<sup>2</sup> ГНЦ РФ ФЭИ, г. Обнинск, Россия

[baranchikovaar@oiate.ru](mailto:baranchikovaar@oiate.ru)

Данная работа посвящена рассмотрению зависимости влияния константной неопределенности урана-238 на результаты нейтронно-физического расчета. Так как при проектировании и обосновании новых реакторных установок одной из важных составляющих является знание или определение методической, технологической и константной неопределенностей.

*Ключевые слова: Неопределенности сечения, возмущение групповых констант, 26-ти групповой диффузионный двухмерный код.*

## DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF THE CONSTANT UNCERTAINTY OF URANIUM-238 ON THE MAIN NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE VVER-1200 REACTOR.

Baranchikova A.O.<sup>1</sup>, Isanov K.A.<sup>1</sup>, Manturov G.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IATE NIUYA MEPHI, Obninsk, Russia <sup>2</sup> GNC RF FEI, Obninsk, Russia

[baranchikovaar@oiate.ru](mailto:baranchikovaar@oiate.ru)

This work is devoted to the consideration of the dependence of the influence of the constant uncertainty of uranium-238 on the results of neutron physics calculations. Since in the design and justification of new reactor installations, one of the important components is the knowledge or determination of methodological, technological and constant uncertainties.

*Keywords: Section uncertainties, perturbation of group constants, 26-group diffusion two-dimensional code.*

Методическая погрешность является погрешностью, связанной с методом и приближениями нейтронно-физического расчета, ее можно также разложить на групповую и гетерогенную неопределенность. Примерное значение и характер данной неопределенности может быть предсказан. Следующий вид неопределенности – технологический, обусловленный флуктуацией точности многих технологических параметров при изготовлении. Третий вид погрешности – константный, который зависит от экспериментальной базы. При переходе на новый вид топлива или топливный цикл, актуальной становится проблема уточнения погрешности цененных ядерных данных.

В данной работе рассмотрено влияния неопределенности сечения радиационного захвата урана-238 на следующие функционалы:  $K_{\infty}$ ,  $K_{\text{eff}}$ , длительность кампании, влияние на наработку изотопов плутония и америция.

В качестве расчетной модели была выбрана реакторная установка ВВЭР-1200 [1, 2]. Расчет проводился на 26-ти групповом диффузионном двухмерном коде, со стандартной разбивкой библиотек по группам (по БНАБ). Был проведен стандартный расчет, определено обогащения для необходимого запаса реактивности на кампанию. В дальнейшем, проводилось поочередное возмущение групповых констант на  $\pm 10\%$ , параллельно фиксировались основные нейтронно-физические характеристики и сравнивались со стандартным вариантом рис 1.

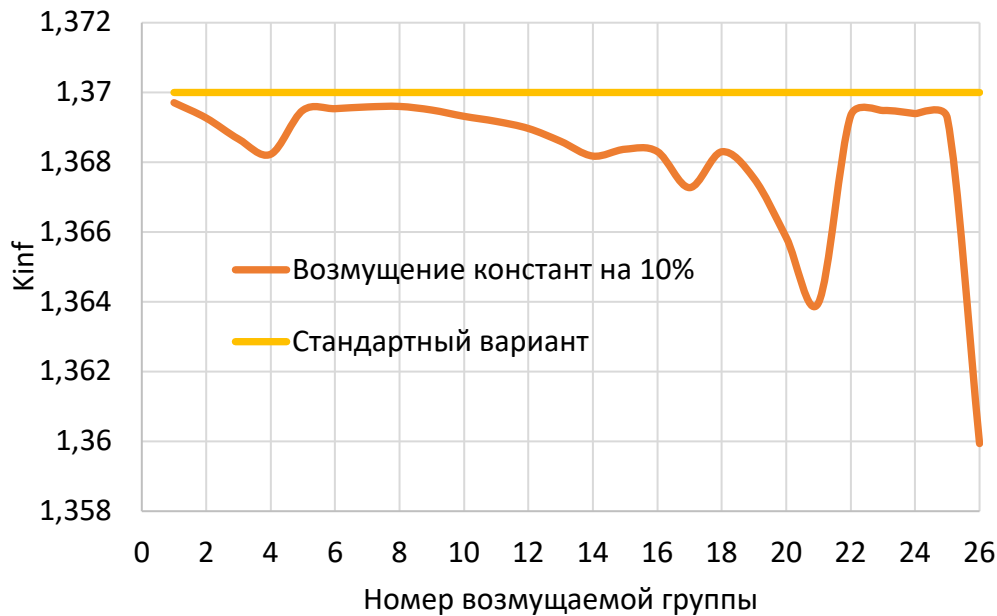


Рис. 1. Влияние возмущения групповых констант на функционал  $K_{inf}$ .

После расчета отклонения каждого из функционалов после поочередного возмущения констант, была составлена функция чувствительности для каждого из функционалов. На рисунке 2 представлена наработка изотопов плутония на конец кампании 1500 эфф.суток

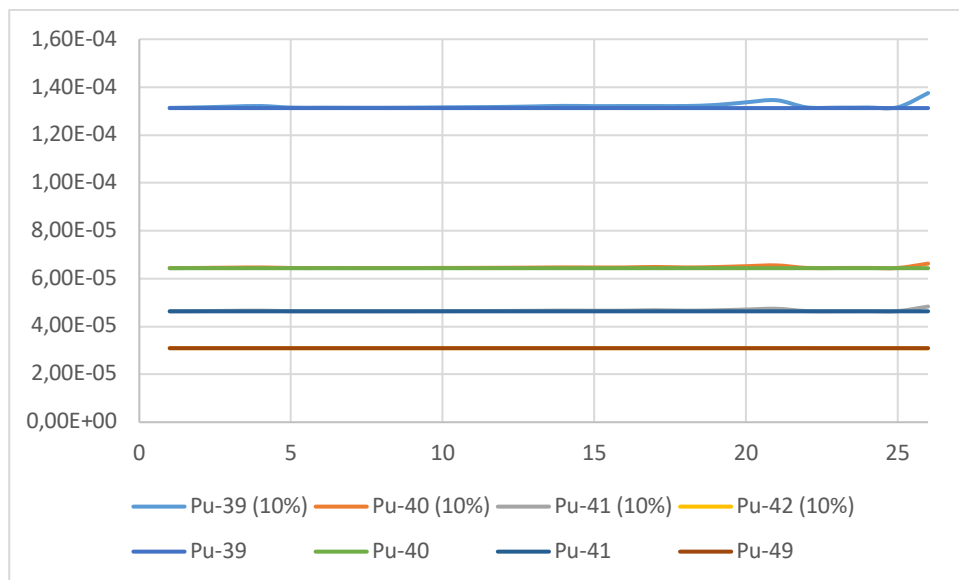


Рис. 2. Наробotka изотопов плутония

*Использованные источники:*

1. Андрианов А. А., Коробейников В. В. и др. Оптимизационные исследования структуры ядерной энергетики России с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах с использованием пакета MESSAGE. Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. - №2. – С. 160-163.
2. Ковалев Н. В., Прокошин А. М. и др. Использование плутония из отработавшего смешанного топлива РЕМИКС в реакторе БН-1200.- Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. - №1. – С. 70-71.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КУРОПАТЕНКО

Беляев П. Е.<sup>1,2</sup>, Макеева И.Р.<sup>1,2</sup>, Мастюк Д.А.<sup>1</sup>, Пигасов Е.Е.<sup>1,2</sup>, Куприянец Т.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск,

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ) г. Челябинск

[belyaevpe@vniitf.ru](mailto:belyaevpe@vniitf.ru)

В работе представлена модель односкоростной химически реагирующей сплошной среды в осесимметричном приближении, основанная на методе Куропатенко. Приводится сравнение результатов моделирования по указанной модели с экспериментальными данными по распространению пламени в водород-воздушных смесях в ударной трубе с перегородками. Сравнение скоростей фронта пламени демонстрирует хорошее согласие с экспериментальными данными.

*Ключевые слова: водород, ударные трубы, CFD, моделирование горения.*

## NUMERICAL SIMULATION OF BURNING OF HYDROGEN-AIR MIXTURES WITH USE OF KUROPATENKO METHOD

Belyaev P.E.<sup>1,2</sup>, Makeyeva I.R.<sup>1,2</sup>, Mastyuk D.A.<sup>1</sup>, Pigasov E.E.<sup>1,2</sup>, Kupriyanets T.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia

<sup>2</sup> SUSU, Chelyabinsk

[belyaevpe@vniitf.ru](mailto:belyaevpe@vniitf.ru)

An axisymmetric model of one-speed chemically reacting continuum based on Kuropatenko method is presented in present study. Comparison of results of numerical simulation and experimental data on flame propagation in hydrogen-air mixture in shock tube with orifice plates is provided. Comparison of flame front speed is in good agreement with experimental data.

*Keywords: hydrogen, shock tube, CFD, combustion simulation.*

В соответствии с дорожной картой проекта по декарбонизации энергетики Net Zero, представленной международной энергетической организацией в 2021 году [1], переход к производству энергии без выбросов углерода должен завершиться к 2050 году. Согласно данным, представленным в отчете этой организации, к 2030 году мировые инвестиции в исследования топливных технологий, обеспечивающих низкие выбросы углекислого газа, достигнут двух триллионов долларов. Среди технологий декарбонизации ключевое место займут источники энергии на основе водорода. При этом, планируемые изменения в политиках ВТО нацелены на снижение прибыльности продукции, произведённой без использования зелёной энергетики. Таким образом, повсеместное развитие и внедрение водородных энергетических технологий неизбежно.

Среди более масштабных и дешёвых подходов к производству «голубого» водорода в России рассматривается парокаталитический риформинг метана с использованием генерируемого АЭС с ВТГР тепла и технологий захвата и хранения углекислого газа для уменьшения углеродного следа [2]. В связи с широкими концентрационными пределами горения водород-воздушных смесей, малой энергией воспламенения, его способностью к диффузии через стенки традиционных сосудов, склонностью к стратификации и подверженностью металлов водородному охрупчиванию, масштабное производство, хранение, транспортировка и использование водорода сопряжены со значительно большей опасностью в сравнении с углеводородной энергетикой.

Особенную опасность представляет большая склонность водород-воздушных смесей к ускорению и переходу от дефлаграционного к детонационному режиму горения. Так

давление на фронте детонационной волны в водород-воздушной смеси может достигать 1.6 МПа, а в водород-кислородной – 4 МПа [3]. Значительный вклад в исследование горения водород-воздушных составов внесли как зарубежные [4, 5], так и отечественные авторы [6]. Исследования показывают существенное изменение характера распространения пламени в водород-воздушных средах с изменением состава смеси и геометрии пространства. Так показано, что существенную роль в ускорении фронта пламени и переходе из дефлаграции в детонацию играет турбулизация течения при наличии загромождений на пути распространения. При этом, не смотря на продолжающиеся по сей день попытки вывести универсальный критерий дефлаграционно-детонационного перехода [7], множество найденных условий ускорения пламени для частных случаев, вопрос ускорения пламени в конкретных условиях по-прежнему остаётся открытым.

Таким образом, исследование процесса горения водородсодержащих смесей в пространствах с разной геометрией, без привлечения консервативных предположений, требует воссоздания такой геометрии, что представляется экономически нецелесообразным. В то же время математические модели, верифицированные на основании экспериментальных данных, способны выступить инструментом для анализа таких процессов в расчётной области с произвольной геометрией.

В данной работе рассматривается использование модели многокомпонентной односкоростной однофазной сплошной среды, сходной с предложенной в [9]. При моделировании течений химически реагирующих газовых смесей в диапазоне изменения температур и давлений, характерных для технологических и аварийных процессов водородной энергетики использование такой модели обеспечивает хорошее согласие с экспериментальными данными, при этом сохраняет относительно низкие требования к вычислительным мощностям.

Подходы к моделированию химических превращений и, в частности, горения также существенно различаются по сложности и детальности [10]. В наиболее простом случае могут быть рассмотрены одна-две брутто-реакции, переводящие реагенты в продукты. Разной степени упрощения модели распространения пламени обычно связывают скорость фронта пламени с ламинарной и турбулентной скоростями распространения пламени, для определения которых необходимо использовать экспериментальные данные и различные модели турбулентности. Представленный в данной работе подход к моделированию химических превращений включает прямое решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений, построенной по выбранному кинетическому механизму, аналогичное рассмотренному в [9], подробно описанный в [11].

Таким образом, целью проводимых исследований является разработка модели химически реагирующей сплошной среды, позволяющей исследовать горение, ускорение и дефлаграционно-детонационный переход в водород-содержащих смесях на основе газодинамической модели, описанной в [12]. При численном решении полученной системы уравнений используется модификация метода В.Ф. Куропатенко, представленного в [13]. В работе представлено тестирование разработанной модели и сравнение с экспериментальными данными по ускорению пламени в ударной трубе с перегородками, опубликованными в [14].

*Использованные источники:*

1. IEA (2021), Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, License: CC BY 4.0
2. V.V. Petrunin, I.V. Marov, N.G. Kodochigov, Hydrogen energy and large scale hydrogen production with nuclear power plants based on high-temperature reactors/ Journal of Physics: Conference Series 1683 (2020) 042031 doi:10.1088/1742-6596/1683/4/042031
3. Гельфанд, Б.Е. Водород: параметры горения и взрыва / Б.Е. Гельфанд, О.Е. Попов. – М.: Физматлит, 2008.

4. S.B. Dorofeev; V.P. Sidorov; A.E. Dvoinishnikov; W. Breitung (1996). Deflagration to detonation transition in large confined volume of lean hydrogen-air mixtures. , 104(1-2), 95–110. doi:10.1016/0010-2180(95)00113-1,
5. A. Vesper, W. Breitung, G. Engel, G. Stern, A. Kotchourko Deflagration to Detonation Transition Experiments with Hydrogen-Air Mixtures in Shock Tube and Obstacle Array Geometries (1999)
6. Т. В. Баженова, М. В. Брагин, В. В. Голуб, М. Ф. Иванов, Ударноволновой механизм самовоспламенения водорода при внезапном истечении из резервуара под высоким давлением, ТВТ, 2007, том 45, выпуск 5, 733–740
7. Wang L-Q, et al., Experimental study of detonation propagation in a square tube filled with orifice plates, International Journal of Hydrogen Energy (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.080>
8. Нигматулин Р.И., «Динамика многофазных сред», т. 1, 2, Москва: Наука, 1987. 464 с.
9. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. Москва: Физматлит, 2006. 351 с.
10. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. Москва: Мир, 1990. 661 с.
11. Пигасов Е.Е., Рябинин В.К., Ковалёв Ю.М. Математическое моделирование адиабатического теплового взрыва для реакции окисления водорода // Вестник ЮУрГУ, сер. Математическое моделирование и программирование. – 2013. – Том 6 - № 3
12. Беляев П.Е., Макеева И.Р., Пигасов Е.Е., Мастюк Д.А. Адаптация метода Куропатенко для расчета ударных волн в эйлеровых координатах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование» (Вестник ЮУрГУ ММП). – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 83–96
13. Куропатенко В.Ф. О разностных методах для уравнений гидродинамики / В.Ф. Куропатенко // Труды матем. Института им. В.А. Стрелова. – 1966. – Т. 74 Ч. 1. – С. 107-137.
14. R. Porowski, A. Teodorczyk, Experimental study on DDT for hydrogen-methane-air mixtures in tube with obstacles / Journal of Loss Prevention in the Process Industries 26 (2013) 374-379



## РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КАССЕТ С ОЯТ ИЗ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

Блинов А.С., Доценко В.В., Жабунина О.Ю., Лушина Ю.Ю., Никульшин М.В.,  
Титов В.В., Товмасын Е.А.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.  
[M.V.Nikulshin@vniitf.ru](mailto:M.V.Nikulshin@vniitf.ru)

Темой доклада являются результаты комплексного обоснования прочности технологического оборудования Белоярской АЭС, используемого для перемещения кассет К-35, К-17н, К-17у с отработанным ядерным топливом в бассейны выдержки. Приводятся данные расчётных исследований напряженного состояния имеющегося и вновь разработанного оборудования в условиях эксплуатации и для заданных аварийных ситуаций. По результатам выполненных работ показано, что прочность рассмотренных конструкций обеспечивается. При возможных авариях герметичность кассет и целостность облицовки бассейнов выдержки сохраняется. Требования по безопасному перемещению кассет К-35, К-17н, К-17у в бассейн выдержки выполняются.

*Ключевые слова:* Отработанное ядерное топливо, кассета, бассейн выдержки, направляющие, опоры, рельсы, транспортная тележка, демпфер, инерционная нагрузка, сейсмическое воздействие, аварийное падение.

## DESIGN-BASIS JUSTIFICATION OF DURABILITY OF THE STRUCTURES DESIGNED FOR SAFE TRANSPORTATION OF SNF ASSEMBLIES FROM BELOYARSKAYA NPP STORAGE POOL

Blinov Aleksandr, Dotsenko V.V., Zhabunina O.Yu., Lushina Y.Y., Nikulshin M.V., Titov V.V.,  
Tovmasyan E.A.  
FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin », Snezhinsk, Chelyabinsk region  
[M.V.Nikulshin@vniitf.ru](mailto:M.V.Nikulshin@vniitf.ru)

The results of the comprehensive design-basis justification are reported addressing the durability of Beloyarskaya NPP technological equipment used for moving K-35, K-17n, K-17u fuel assemblies containing spent nuclear fuel to the storage pools. Calculation analysis data covering stress states of the available and newly developed equipment in operation conditions and defined emergency cases are given. The obtained results prove the durability of the considered structures. Hermeticity of fuel assemblies and integrity of storage pools lining are shown to be maintained in possible accidents. Requirements to safe transport of K-35, K-17n, K-17u fuel assemblies to storage pools are met.

*Keywords:* spent nuclear fuel (SNF), fuel assembly, storage pool, guides, supports, rail, railcar, damper, inertial load, seismic impact, emergency fall.

### Введение

На Белоярской атомной электростанции (БАЭС) отработанное ядерное топливо (ОЯТ) реакторов хранится в кассетах К-35, К-17н, К-17у в бассейнах выдержки (БВ) БВ-1 и БВ-2 первой очереди. В связи с запланированным ремонтом БВ возникла необходимость перемещения всех кассет сначала из БВ-2 в БВ-1, затем после завершения ремонта БВ-2 – в обратной последовательности для последующего ремонта БВ-1. На первой очереди БАЭС имеется технологическая возможность перегрузки только кассет К-17н из БВ-1 в БВ-2 и обратно. Для выполнения поставленной задачи для кассет К-35 и К-17у потребовалось

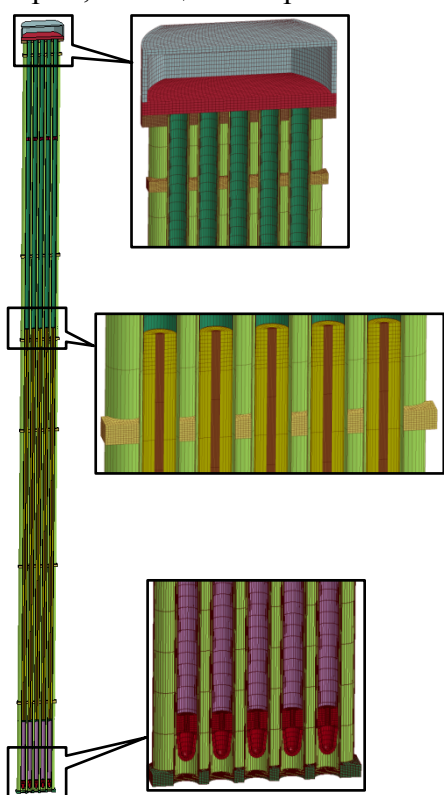
провести модернизацию существующего технологического оборудования 1958 года и разработать ряд новых конструктивных узлов.

В работе рассмотрено следующее технологическое оборудование: направляющие, транспортная тележка, опоры, рельсовые пути, демпферы. Расчеты проведены для инерционного и динамических нагружений, сейсмического воздействия и аварийных ситуаций (АС), возможных при падении кассеты.

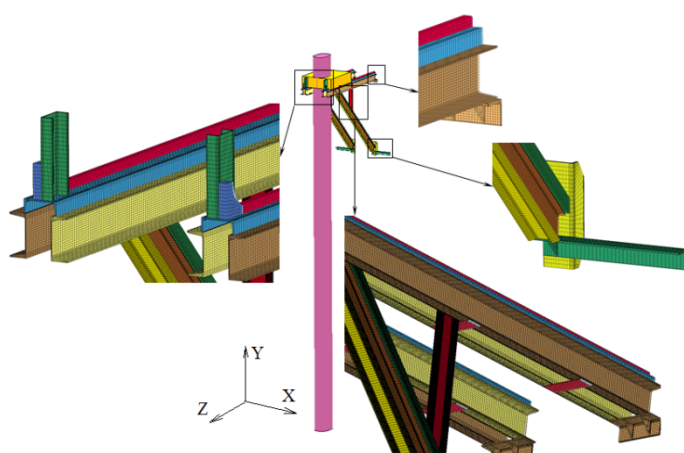
Расчеты выполнены методом конечных элементов с использованием программного комплекса ЛОГОС [1, 2].

### Постановка задачи

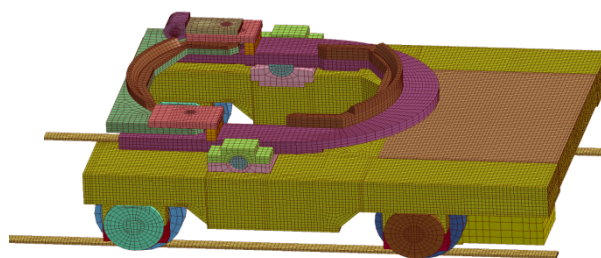
Кассеты К-35, К-17н, К-17у представляют собой длинномерные конструкции. Максимальными габаритно-массовыми параметрами обладает кассета К-35, которая и рассматривается далее в работе. Масса загруженной кассеты К-35 - 9800 кг, длина -14,3 м, диаметр - Ø800 мм. Бассейны выдержки - облицованные стальными листами бетонные конструкции, заполненные водой. Перемещение кассет по БВ осуществляется в тележках по опорам, оснащённым рельсовыми путями.



КЭМ кассеты К-35 (в разрезе)



КЭМ опоры



КЭМ транспортной тележки

В работе рассмотрены следующие расчетные случаи:

1. обоснование прочности направляющей, предназначенной для позиционирования кассет при их установке на опорную поверхность транспортных тележек;
2. определение напряженно-деформированного тележки с кассетой под действием собственного веса;
3. оценка прочности тележки и опор при сейсмическом воздействии 6 баллов по шкале MSK-64;
4. исследование прочности опор и рельсовых путей, поврежденных коррозией;
5. определение скорости кассеты при погружении на дно БВ;
6. определение состояния конструкций при аварийном падении кассеты К-35 на тележку;
7. обоснование прочности двух вариантов демпфера, необходимых для снижения нагрузки в случае аварийного падения кассеты К-35 на дно бассейна выдержки.

### Результаты расчетов

1. В случае ударного взаимодействия кассеты с направляющей со скоростью  $V=0,138$  м/с вдоль плоскости симметрии и  $V=0,23$  м/с в поперечном направлении, прочность направляющей обеспечивается.

2. Под действием собственного веса кассеты, деформации элементов тележки происходят в упругой области. Прочность тележки обеспечивается.

3. При сейсмическом воздействии 6 баллов по шкале MSK-64 тележка с кассетой сохраняет свою прочность.

4. При моделировании опор и рельсовых путей учтено снижение толщин элементов конструкции в результате многолетнего воздействия коррозии. По результатам расчета получено, что при действии собственного веса кассеты с тележкой и сейсмическом воздействии опоры и рельсовые пути сохраняют свою прочность.

5. Определение скорости кассеты при погружении на дно бассейна выдержки проведено аналитическим методом с учетом сопротивления воды и веса тела с учетом архимедовой силы. Результаты показали, что при подходе к дну бассейна скорость кассеты не превысит 9 м/с.

6. При падении кассеты на тележку возможно смятие и частичное разрушение элементов конструкции тележки без её фрагментации. При этом в кассете во фланце реализуется смятие без нарушения целостности, прочность чехловых трубок, содержащих ОЯТ, и их герметичность сохраняются.

7. По результатам расчетов прочности двух вариантов демпферов, в обоих случаях происходит полное сложение демпферов. Целостность элементов кассеты обеспечивается. Разрушение облицовки и фундаментной плиты БВ не происходит. При падении кассеты на второй вариант демпфера перегрузки в центре масс кассеты снизились на 40 % относительно первого варианта.

### Заключение

По результатам выполненных расчётных исследований прочности конструкций, предназначенных для безопасного перемещения кассет с ОЯТ из бассейна выдержки Белоярской АЭС, определено, что разработанное оборудование отвечает требованиям прочности и безопасности при эксплуатации и при заданных аварийных ситуациях.

В настоящее время проведена модернизация оборудования, все работы по перемещению кассет с ОЯТ из БВ-1 в БВ-2 выполнены.

#### *Использованные источники:*

1. Программный модуль пакета программ «ЛОГОС» для моделирования прочности (ЛОГОС ПА): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611831 от 04.02.2019.

2. Руководство пользователя ЛОГОС 5.3.19.

## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В РАМКАХ ПРОСТЫХ МОДЕЛЕЙ

Боярских К.А.<sup>1,2</sup>, Хищенко К.В.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», Долгопрудный,  
Московская обл.

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск  
[shagom55@gmail.com](mailto:shagom55@gmail.com)

Аннотация. Работа посвящена описанию теплофизических свойств жидкометаллических теплоносителей для ядерных энергетических установок. Получены уравнения состояния жидких фаз свинца и висмута в рамках пяти простых моделей. Рассчитаны ударные адиабаты и изоэнтропы разгрузки ударно-сжатых исходно пористых образцов исследуемых металлов, результаты расчетов сопоставлены с данными ударно-волновых экспериментов. Определены границы применимости полученных уравнений состояния.

*Ключевые слова:* уравнения состояния, жидкие металлы, свинец, висмут, ударные волны, высокие температуры

## EQUATIONS OF STATE OF LIQUID METAL COOLANTS FOR NUCLEAR POWER INSTALLATIONS WITHIN SIMPLE MODELS

Boyarskikh K.A.<sup>1,2</sup>, Khishchenko K.V.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

<sup>3</sup>South Ural State University, Chelyabinsk  
[shagom55@gmail.com](mailto:shagom55@gmail.com)

Abstract. The work is devoted to the description of the thermophysical properties of liquid metal coolants for nuclear power plants. Equations of state for the liquid phases of lead and bismuth were obtained within five simple models. The shock adiabats and unloading isentropes of shock-compressed initially porous samples of the metals under study are calculated, and the calculation results are compared with the data of shock-wave experiments. The limits of applicability of the obtained equations of state are determined.

*Key words:* equations of state, liquid metals, lead, bismuth, shock waves, high temperatures

Знание свойств жидких фаз свинца и висмута важно для ядерной энергетики. В настоящей работе получены уравнения состояния этих жидкометаллических теплоносителей. Рассмотрено пять моделей, первая из которых представляет собой уравнение Ван-дер-Ваальса [1], в рамках которой удельная свободная энергия в предположении постоянства удельной изохорной теплоемкости (это предположение распространяется и на остальные модели) имеет вид

$$F(V, T) = c_{v0} T \ln \frac{e}{T} - RT \ln(V - b) - \frac{a}{V}. \quad (1)$$

Здесь  $F$  — свободная энергия единицы массы вещества;  $T$  — температура;  $V$  — удельный объем;  $c_{v0}$  — постоянная удельная изохорная теплоемкость;  $R$  — удельная газовая постоянная, равная отношению универсальной газовой постоянной к молярной массе вещества;  $e$  — число Эйлера;  $a$  и  $b$  — параметры. Вторая модель [2] определяется выражением

$$F(V, T) = c_{v0} T \ln \frac{e}{T} - RT \ln(V - b) - \frac{3a}{V^{1/3}}. \quad (2)$$

Здесь и далее обозначения такие же, как в уравнении (1). В третьей модели [3] дополнительно вводится параметр  $\kappa$ :

$$F(V, T) = c_{v0} T \ln \frac{e}{T} - RT \ln(V - b) - \frac{a}{\kappa} \ln \frac{V + \kappa}{V}. \quad (3)$$

Четвертая модель является обобщением первых двух, в ней вводится дополнительный параметр  $\xi$ , определяющий степень удельного объема в упругой компоненте термического уравнения состояния:

$$F(V, T) = c_{v0} T \ln \frac{e}{T} - RT \ln(V - b) - \frac{a}{(\xi - 1)V^{\xi-1}}. \quad (4)$$

В пятой модели [4, 5] присутствует дополнительный параметр  $c$ , позволяющий существенно улучшить качество описания опытных данных по сравнению с уравнением (1). Соответствующее выражение имеет вид

$$F(V, T) = c_{v0} T \ln \frac{e}{T} - \frac{c}{b} RT \ln \frac{V - b}{V^{1-b/c}} - \frac{a}{V}. \quad (5)$$

Параметры уравнений (1)—(5) определяются из условия оптимального описания опытных данных по изобарическому расширению жидкой фазы и ударному сжатию исходно пористых образцов исследуемых металлов. Верификация полученных результатов проводится с помощью ударно-волновых данных для исходно пористых образцов. Для каждой модели определены границы применимости.

Полученные результаты могут быть использованы при моделировании процессов, сопряженных с достижением высоких давлений и температур в ядерных энергетических установках.

*Использованные источники:*

1. Van der Waals J.D. On the Continuity of the Gaseous and Liquid States. — Leiden, 1873.
2. Kupershtokh A.L., Medvedev D.A., Karpov D.I. On equations of state in a lattice Boltzmann method // Computers and Mathematics with Applications. — 2009. — V. 58. — P. 965—974.
3. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б. О термодинамическом обосновании формы единого уравнения состояния жидкости и газа // ТВТ. — 2003. — Т. 41, № 3. — С. 373—380.
4. Ликальтер А.А. Критические точки конденсации в кулоновских системах // УФН. — 2000. — Т. 170, № 8. — С. 831—854.
5. Петрик Г.Г., Гаджиева З.Р. Однопараметрическое семейство уравнений состояния на основе модели точечных центров и его связь с однопараметрическим законом соответственных состояний // Мониторинг. Наука и технологии. — 2010. — № 1. — С. 67—78.



## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПРОТЕКАНИИ ТОКА ЧЕРЕЗ ПЛАСТИНУ-ФЛАЕР

Григорьев<sup>1,2</sup> А.Н., Борщевский<sup>2</sup> М.А., Матвеев<sup>2</sup> И.В., Лубенченко<sup>1,2</sup> Н.А.  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.  
<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская

В работе используется идея замены массивных проводников элементарными витками с одним общим для всех витков системы обратным элементарным проводником. Метод позволяет непосредственно наблюдать динамику изменения элементарных токов в нагреваемом проводнике (пластине, фольге) и обратном токопроводе.

*Ключевые слова:* Электрический взрыв проводников, элементарный проводник, интеграл действия, удельная вложенная энергия.

## ELECTRICAL CALCULATION OF CURRENT DISTRIBUTION DURING PULSED CURRENT FLOW THROUGH A FLYER PLATE

Grigoriev A.N.1,2, Borshevsky M.A.1, Matveev I.V.1, Lubenchenko  
N.A.1,2  
IFGUP "RFNC VNIITF named after Acad. E.I. Zababakhin", Snezhinsk.  
2SFTI NRNU "MEPhI", Snezhinsk.  
[alex\\_nick@mail.ru](mailto:alex_nick@mail.ru)

The paper utilizes the idea of replacing massive conductors by elementary coils with one common for all coils of the system reverse elementary conductor. The method allows us to directly observe the dynamics of elementary currents change in the heated conductor (plate, foil) and the return conductor.

*Keywords:* Electrical explosion of conductors, elementary conductor, integral of action, specific embedded energy.

### 1 Введение

Расчет распределения тока представляет практический интерес во многих практических задачах, например, в плоских шинах, в ускоряемой магнитном полем пластине-флаере, при электрическом взрыве фольг. При этом, как было показано в [1], при электрическом взрыве фольг из меди и алюминия наблюдается неоднородность формирования пространственно-временного профиля давления. Там же высказано предположение, что неоднородность взрыва определяется неоднородностью плотности тока по ширине фольги (вследствие диффузии магнитного поля в фольгу), что косвенно было подтверждено в работе [2], где по результатам экспериментов с фольгами из различных металлов четко прослеживалось влияние начального удельного электрического сопротивления взрывающейся фольги на неоднородность взрыва (при прочих равных условиях – размерах фольги и вложенной в фольгу энергии).

В связи с этим представляет несомненный интерес расчет динамики токораспределения (плотности тока) по сечению взрывающейся фольги, а также расчет токораспределения по сечению пластины (флаера) при импульсном протекании тока через нее. Оценки и расчет [3, 4] токораспределения в плоских шинах (нагрев не учитывается) показывают, что большая часть тока протекает по краям шины.

Сложность расчета токораспределения (обусловленного скин-эффектом и эффектом близости) в пластине (флаере) и фольге заключается в трудности расчленения задачи на



цепную и полевую. Применение методов конечных элементов и конечных разностей связано с необходимостью выполнения перерасчета поля токопровода на каждом временном шаге, с учетом не только сечения проводников, но и окружающих их диэлектриков.

Нами за основу были взяты работы М.А. Шакирова и Р.П. Кияткина [3, 4] (развивающие идеи Швенкхагена [5]), в которых рассмотрен плоский случай и рассчитана динамика скин-эффекта при разряде емкостного накопителя через прямолинейные шины. В нашем случае в качестве одной шины выступает фольга (пластина), нагрев которой мы должны учесть. Ключевой является идея о представлении шины и фольги совокупностью элементарных витков (ЭВ) с одним общим обратным (опорным) элементарным проводником (ЭП). Опорный ЭП (ОП) в системе из фольги (А) и шины В обозначен  $O_B$  (рис. 1). В плоском случае плотность тока постоянна по длине проводника и меняется в поперечном сечении. Число ЭП, образующих разрядный контур с пластиной (фольгой), не ограничено, формы их сечений могут быть произвольны.

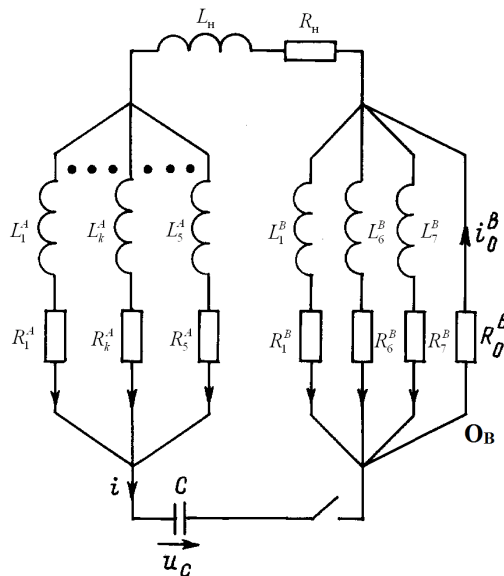


Рис. 1 – Схема замещения цепи, включающей ЭП прямого и обратного токопровода, конденсаторную батарею, индуктивность и активное сопротивление подводящей линии

Для тестирования описанного метода вначале рассматривается задача без нагрева проводника с целью определения индуктивности системы "прямой – обратный токопровод". Затем рассматриваются задачи с нагревом и взрывом проводников различной геометрии.

## 2 Математическая постановка

Пластина (фольга) А и шина (обратный токопровод) В (см. рис. 1) разбивается на несколько элементарных витков (ЭВ), обладающих активным сопротивлением  $R_k$  и собственной индуктивностью  $L_k$ . Все ветви индуктивно связаны друг с другом, по ним протекают объемные элементарные токи (однородны по сечению).

В схеме учитывается индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$  разрядного контура, не включающие проводники А и В. Предполагается, что все рассматриваемые проводники являются немагнитными (диа- или парамагнитными).

При записи уравнений, описывающих схему замещения (см. рис. 1), используются следующие допущения:

- 1) токи смещения в шинах (пластинах) пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости, т.е. переходные процессы в системе квазистационарны;
- 2) магнитная проницаемость токонесущих пластин равна магнитной постоянной  $\mu_0 \approx 1$ ;
- 3) обратный токопровод (ОТ) не греется, и его удельное сопротивление постоянно;
- 4) между всеми ЭВ имеют место взаимоиндуктивные связи.

Для расчета собственных и взаимных индуктивностей ЭВ (рис. 2), имеющих общий обратный ЭП ОВ, использовались формулы [5]:

$$M_{kk} \equiv L_k = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \ln \frac{d_{k0}^2}{g_k g_0} \quad (1)$$

$$M_{kq} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \ln \frac{d_{k0} d_{q0}}{d_{kq} g_0} \quad (2)$$

где  $d_{k0}$  – расстояние от центра сечения  $k$ -го ЭП до центра сечения опорного ЭП (ОВ);  $g_k = 0,2236 (a_k + b_k)$  – среднее геометрическое расстояния площади прямоугольного сечения  $k$ -ого ЭП от самой себя.

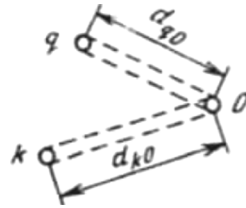


Рис. 2 – К расчету взаимных индуктивностей ЭВ

Формирование системы дифференциальных уравнений схемы замещения является центральной частью рассматриваемого подхода, поскольку в результате решения этой системы в заданном интервале времени можно найти все характеристики переходного скин-эффекта, включая изменение во времени плотностей тока в токонесущей пластине (фольге) и ОТ, а также общий разрядный ток в контуре.

Ключевой идеей, облегчающей формирование уравнений схемы, является выбор таких контуров, каждый из которых содержит общую ветвь своей электрически изолированной системы – опорный ЭП, имеющий сопротивление  $R_0^B$ . Для  $n_A$  контуров, включающих ветви фольги  $A$ , имеем по второму закону Кирхгофа:

$$\sum_{q=1}^{n_A} M_{kq}^A \frac{di_q^A}{dt} + \sum_{q=n_A+1}^{n_A+n_B-1} M_{kq}^{AB} \frac{di_q^B}{dt} + R_k^A i_k^A + L \frac{di}{dt} + Ri + R_0^B i_0^B + u_C = 0 \quad (3)$$

где  $k$  меняется от 1 до  $n_A$ . Для  $(n_B-1)$  контуров, содержащих ветви  $B$ -шины, можно записать:

$$\sum_{q=1}^{n_A} M_{kq}^{BA} \frac{di_q^A}{dt} + \sum_{q=n_A+1}^{n_A+n_B-1} M_{kq}^B \frac{di_q^B}{dt} + R_k^B i_k^B + R_0^B i_0^B = 0 \quad (4)$$

Преобразуем уравнение (3) подстановкой в него уравнения для тока нагрузки

$$i = \sum_{q=1}^{n_A} i_q^A :$$

$$\sum_{q=1}^{n_A} (M_{kq}^A)' \frac{di_q^A}{dt} + \sum_{q=n_A+1}^{n_A+n_B-1} M_{kq}^{AB} \frac{di_q^B}{dt} + \sum_{q=1}^{n_A} (R_{kq}^A)' i_q^A + R_0^B i_0^B + u_C = 0 \quad (3')$$

$$\text{где } (M_{kq}^A)' = M_{kq}^A + L; \quad (R_{kq}^A)' = \begin{cases} R_k^A + R, & \text{при } k = q \\ R, & \text{при } k \neq q \end{cases}$$

По первому закону Кирхгофа

$$i = \sum_{k=1}^{n_A} i_k^A, \quad i_0^B = \sum_{k=1}^{n_A} i_k^A + \sum_{q=1}^{n_B-1} i_q^B \quad (5)$$

Перенеся в уравнениях (3') и (4) слагаемые, не содержащие производных токов по времени, в правые части и дополнив их уравнением связи

$$C \frac{du_C}{dt} = i, \quad (6)$$

получим систему уравнений схемы замещения в матричной форме, имеющую следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{M}}_A^L & \mathbf{M}_{AB} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{AB}^T & \mathbf{M}_B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & C \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_A \\ \mathbf{i}_B \\ u_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{R}_{OR}^A & -\mathbf{R}_O & -\mathbf{1} \\ -\mathbf{R}_O^T & -\mathbf{R}_O^B & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_A \\ \mathbf{i}_B \\ u_C \end{pmatrix} \quad (7)$$

где  $\mathbf{i}_A$  – столбец (длиной  $n_A$ ) токов ЭП шины А,  
 $\mathbf{i}_B$  – столбец (длиной  $n_B-1$ ) токов ЭП шины В,  
 $\mathbf{M}_A$  – квадратная матрица ( $n_A \times n_A$ ) собственных (диагональные элементы) и взаимных индуктивностей ЭВ шины А,  
 $\tilde{\mathbf{M}}_A^L$  – матрица, полученная добавлением  $L$  ко всем элементам матрицы  $\mathbf{M}_A$ ,  
 $\mathbf{M}_{AB}$  – матрица  $n_A \times (n_B-1)$  взаимных индуктивностей между ЭВ шин А и В,  
 $T$  – знак транспонирования,  
 $\mathbf{M}_B$  – квадратная матрица  $(n_B-1) \times (n_B-1)$  собственных (диагональные элементы) и взаимных индуктивностей ЭВ шины В,  
 $\mathbf{R}_{OR}^A$  – квадратная матрица ( $n_A \times n_A$ ), элементы которой равны активному сопротивлению ОП, сложенному с  $R$ , к диагональным элементам прибавлены активные сопротивления шины А,  
 $\mathbf{R}_O$  – матрица  $n_A \times (n_B-1)$ , элементы которой равны активному сопротивлению ОП,  
 $\mathbf{R}_O^B$  – квадратная матрица  $(n_B-1) \times (n_B-1)$ , элементы которой равны активному сопротивлению ОП, к диагональным элементам прибавлены активные сопротивления шины В.

### 3 Алгоритм численного решения

Алгоритм численного расчета токораспределения в фольге на базе предлагаемых схем замещения включает следующие этапы:

- 1) Разбиение сечения шины на элементарные проводники с малыми площадями сечений  $S_k$ . Предполагается, что ток  $i_k$   $k$ -го ЭП распределяется по его сечению равномерно и усредненная плотность тока в пределах сечения  $S_k$  равна  $j_k = i_k/S_k$ .
- 2) Вычисление матрицы индуктивностей  $\mathbf{M}$  и матрицы сопротивлений  $\mathbf{R}$ ;
- 3) Расчет начальных активных сопротивлений ЭП. Сопротивление  $k$ -го ЭП равно

$$R_{k0} = l \rho_{k0} / S_{k0} \quad (8)$$

где  $\rho_{k0}$  – удельное сопротивление  $k$ -го ЭП в момент времени  $t = 0$ .

4) Формирование уравнений (2), (3) и решение полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями  $\mathbf{i}_A = \mathbf{i}_B = \mathbf{0}$ ,  $u_c = U_0$ . В случае, если нагрев пластины (фольги) не учитывается, расчет ведется до конечного момента времени. В случае учета нагрева пластины (фольги), после получения токов  $i_k(t + \Delta t)$  и напряжения  $u_c(t + \Delta t)$  через заданный малый интервал  $\Delta t$  проводится пересчет сопротивлений ЭП фольги.

5) Пересчет сопротивлений ЭП на основе интеграла удельного действия (ИУД). ИУД является функцией времени и координат и определяется по формуле

$$h_k(t) = \int_0^t \left( \frac{i_k(t')}{S_k} \right)^2 dt' = \frac{1}{S_k^2} \int_0^t i_k^2(t') dt' \quad (9)$$

Удельное сопротивление ЭП фольги на новом шаге рассчитывается как

$$\rho_k(t + \Delta t) = \rho_{20} \exp\left(\frac{\rho_0 \alpha}{CD} \int_0^{t+\Delta t} j_k^2 dt'\right) \quad (10)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление материала пластины (фольги) при 20 °С,  $\rho_0$  – удельное сопротивление материала пластины (фольги) при 0 °С,  $C$  и  $D$  – удельная теплоемкость и плотность материала пластины (фольги). При нагреве теплоемкость металлов растет, а плотность снижается; этот факт позволяет считать произведение  $CD \approx \text{const}$ . В расчетах использовались два значения  $CD$  алюминия: для твердого состояния 2,348 и для жидкого состояния 2,886.

Пересчет сопротивлений ЭП на основе удельной вложенной энергии (УВЭ), которая равна выделившемуся теплу на активном сопротивлении ЭП, деленному на массу этого ЭП:

$$w_k(t) = \frac{1}{m_k} \int_0^t i_k^2 R_k dt' \quad (11)$$

Сопротивление ЭП фольги рассчитывается по формуле:

$$\frac{\rho_k(t)}{\rho_0} = \frac{R_k(t)}{R_0} = 1 + \beta w_k(t) \quad (12)$$

Энергетический коэффициент сопротивления  $\beta$  зависит от температуры. Графики для алюминия и меди приведены на рис. 3.

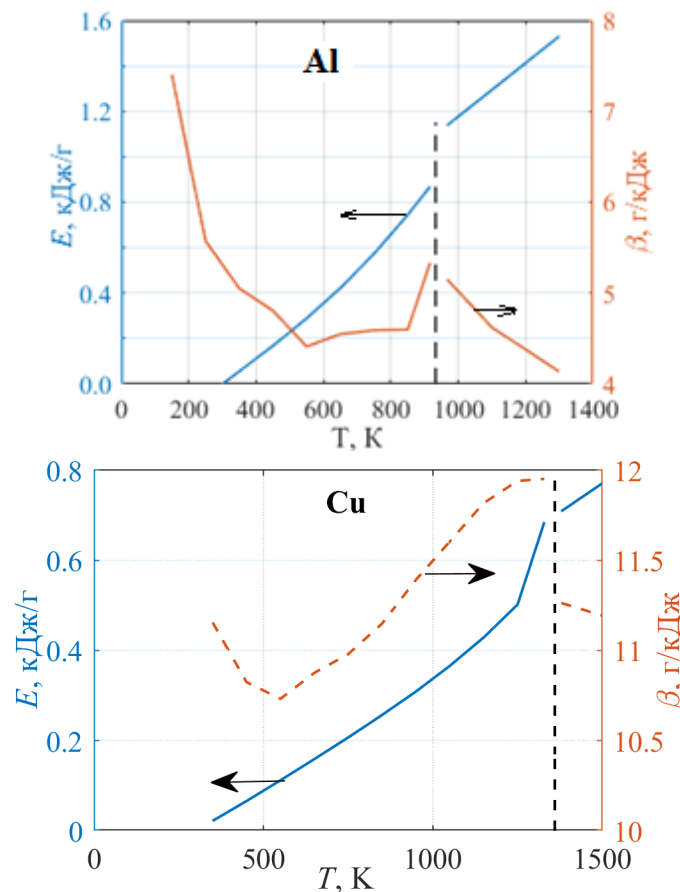


Рис. 3 – Зависимости удельной вложенной энергии и энергетического коэффициента сопротивления от температуры

б) Если ИУД или УВЭ достигает значения, при котором материал взрывается (табл. 1), то вместо формул (7), (9) используем соотношение

$$\rho_k(t + \Delta t) = A \rho_k(t) \quad (13)$$

так, чтобы протекающий по ЭП ток падал до нуля за время порядка 0,2 мкс.

Таблица 1 – Значения удельной вложенной энергии и энергетического коэффициента сопротивления для различных фазовых состояний

Стадии ЭВП	$\beta$ алюминия, г/кДж	$\beta$ меди, г/кДж	$w$ алюминия, кДж/г	$w$ меди, кДж/г
Нагрев	6,25	10	0–0,64	0–0,47
Плавление	5,8	7,4	0,64–1,02	0,47–0,68
Жидкость	5,06	6,4	1,02–2,96	0,68–1,34
Взрыв	–	–	2,96–11,9	1,34–5,32

7) Повтор действий 4–6 на следующем шаге по времени.

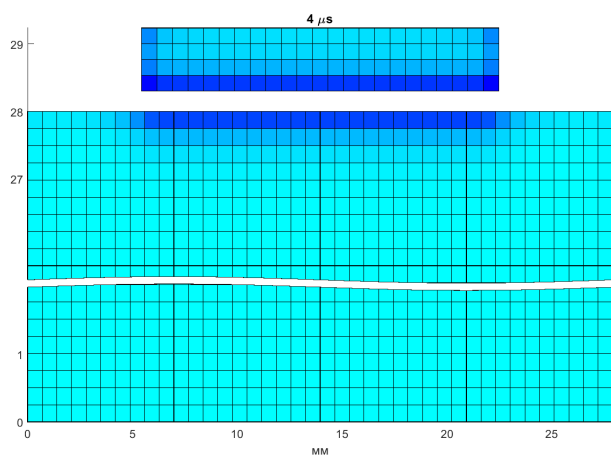
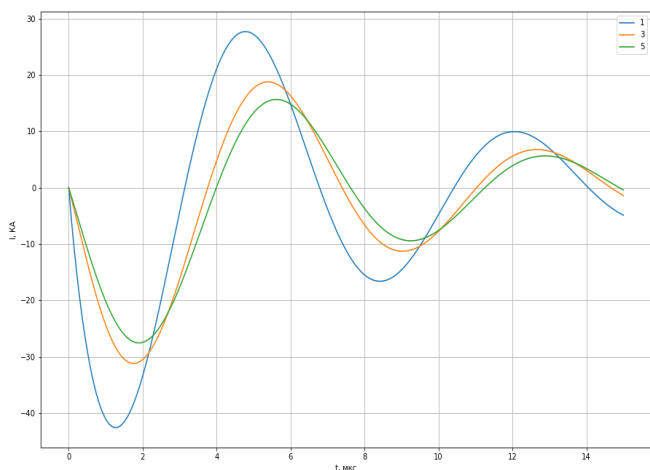
Таблица 2 – Значения интеграла удельного действия для различных фазовых состояний

Стадии ЭВП	$h$ алюминия, $10^9 \text{ A}^2 \text{ c/cm}^4$	$h$ меди, $10^9 \text{ A}^2 \text{ c/cm}^4$
Нагрев	0 – 0,31	0 – 0,94
Плавление	0,31 – 0,39	0,94 – 1,07
Взрыв	0,90	1,95

## 4 Результаты расчетов и сравнение с экспериментом

### 4.1 Результаты расчета без нагрева

На рис. 4 приведены результаты расчета токораспределения в системе "алюминиевая пластина – стальной ОТ" без нагрева. Из-за эффекта близости и скин-эффекта, максимальная амплитуда тока в проводнике А наблюдается в ближайшем к поверхности проводника В слое. Внутри этого слоя наибольшая плотность тока наблюдается у краев (рис. 4). Цифрами 1, 3 и 5 обозначены крайний осевой и промежуточные ЭП слоя.



а)

б)

Рис. 4 – Распределение тока в пластине А (без учета нагрева) (а);  
 распределение тока в пластине А и обратном токопроводе В в момент времени  $t = 4$  мкс (б).  
 $d_A = 0,94$  мм;  $b_A = 17$  мм; расстояние между пластиной и обратным токопроводом 0,3 мм;  
 $U_0 = 22$  кВ;  $C_0 = 187$  мкФ;  $R = 5$  мОм

#### 4.2 Результаты расчета с нагревом. Сравнение с экспериментом

*Результаты расчета токораспределения в алюминиевой токонесущей пластине-флаере.*

Для определения динамики токораспределения в пластине (флаере) и ОТ мы выполнили двумерные численные расчеты в приближении их неподвижности. Для каждого расчета построены график тока в разрядном контуре и падения напряжения на алюминиевой пластине-флаере (рис. 5–8). На рис. 6 также приведены также токи в ЭП пластины. Расчеты проводились для алюминиевого флаера, при этом варьировались: ширина пластины  $b \approx 8..28$  мм, толщина  $d \approx 0,9..2,0$  мм; ёмкость установки составляла  $C_0 \approx 60..187$  мкФ, зарядное напряжение  $U_0 \approx 20..30$  кВ. Суммарный расчетный ток через пластину (флаер) сравнивался с экспериментом.



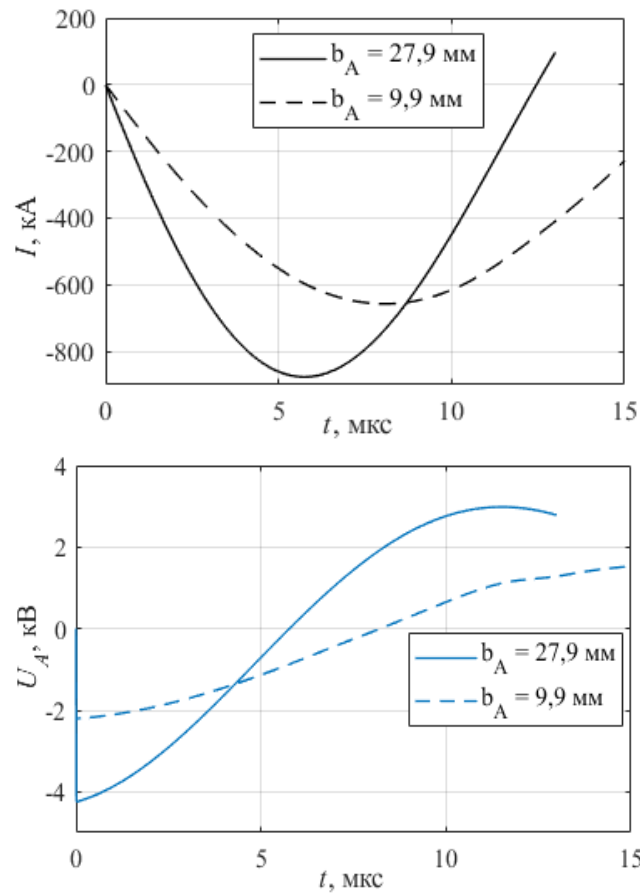
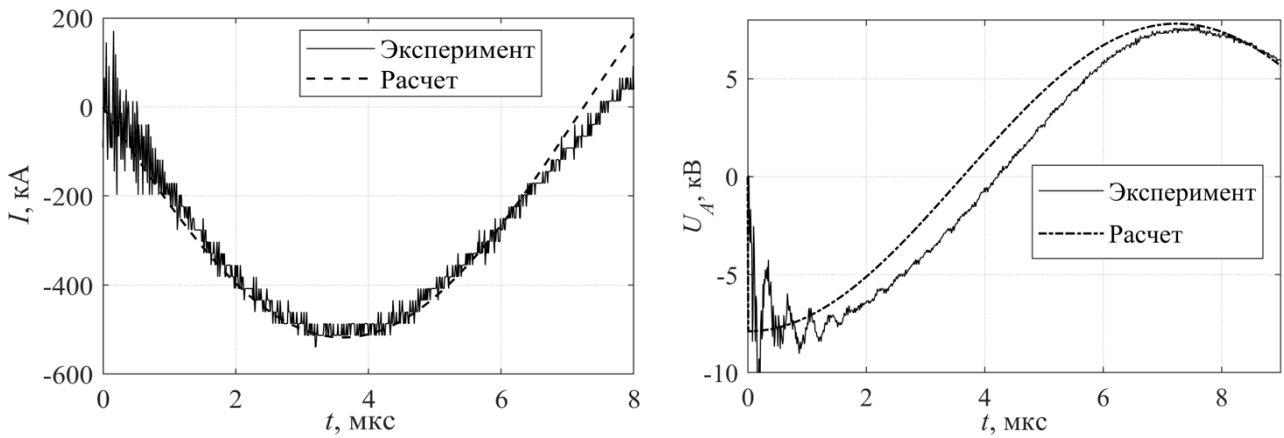
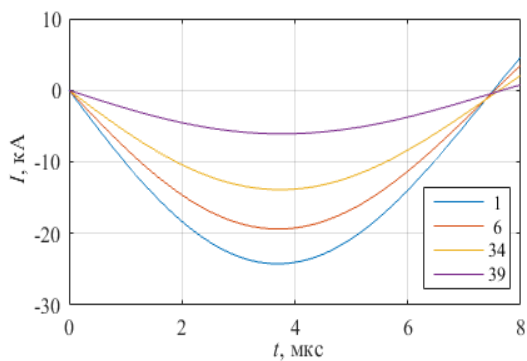


Рис. 5 – Полный ток и напряжение на пластинах толщиной 2,0 мм. Расстояние между пластинами и обратным токопроводом 0,3 мм;  $U_0 = 22$  кВ;  $C_0 = 187$  мкФ, ширины пластин  $b_A$  указаны на графиках



а)



б)

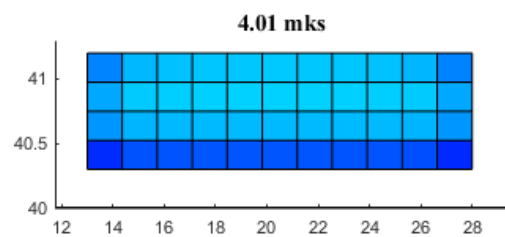


Рис. 6 – Полный ток, напряжение (а) и токи в ЭП пластины (б)  $d = 0,9$  мм,  $b = 27,7$  мм. Расстояние между пластиной и обратным токопроводом 0,3 мм;  $U_0 = 20$  кВ;  $C_0 = 60$  мкФ

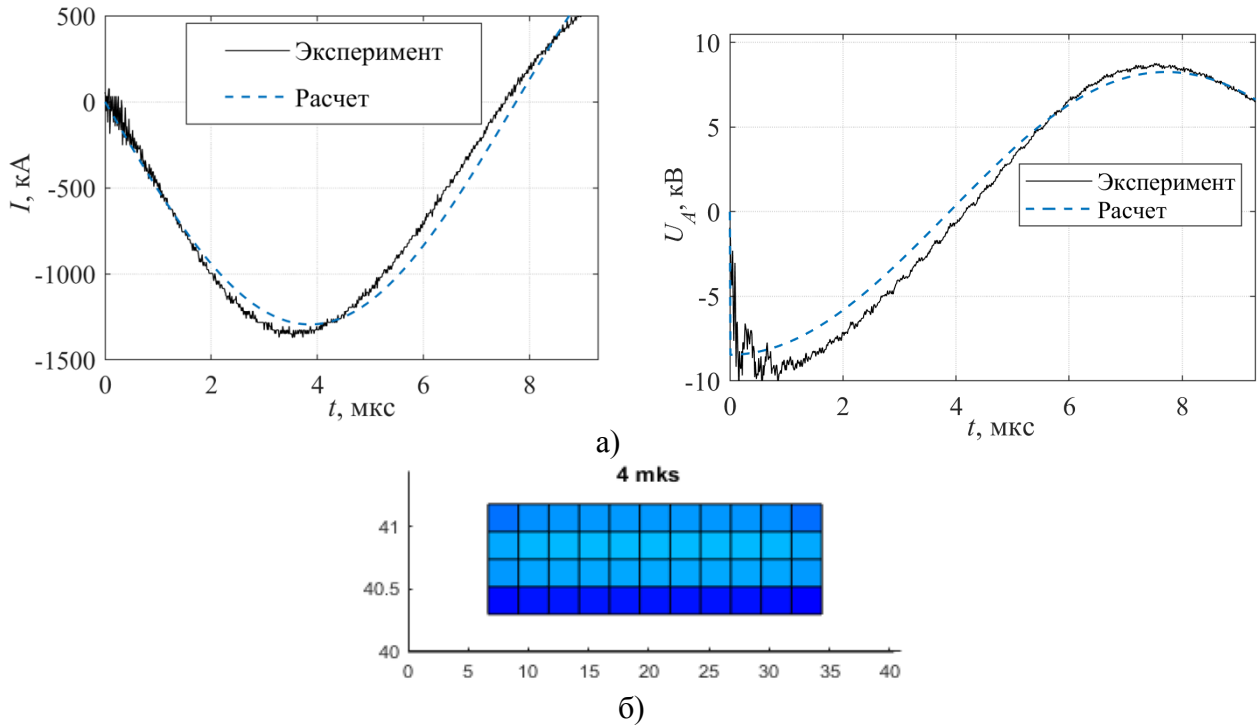


Рис. 7 – Полный ток, напряжение (а) и токи в ЭП пластины (б)  $d = 0,9$  мм,  $b = 27,9$  мм. Расстояние между пластиной и обратным токопроводом 0,3 мм;  $U_0 = 26$  кВ;  $C_0 = 124$  мкФ

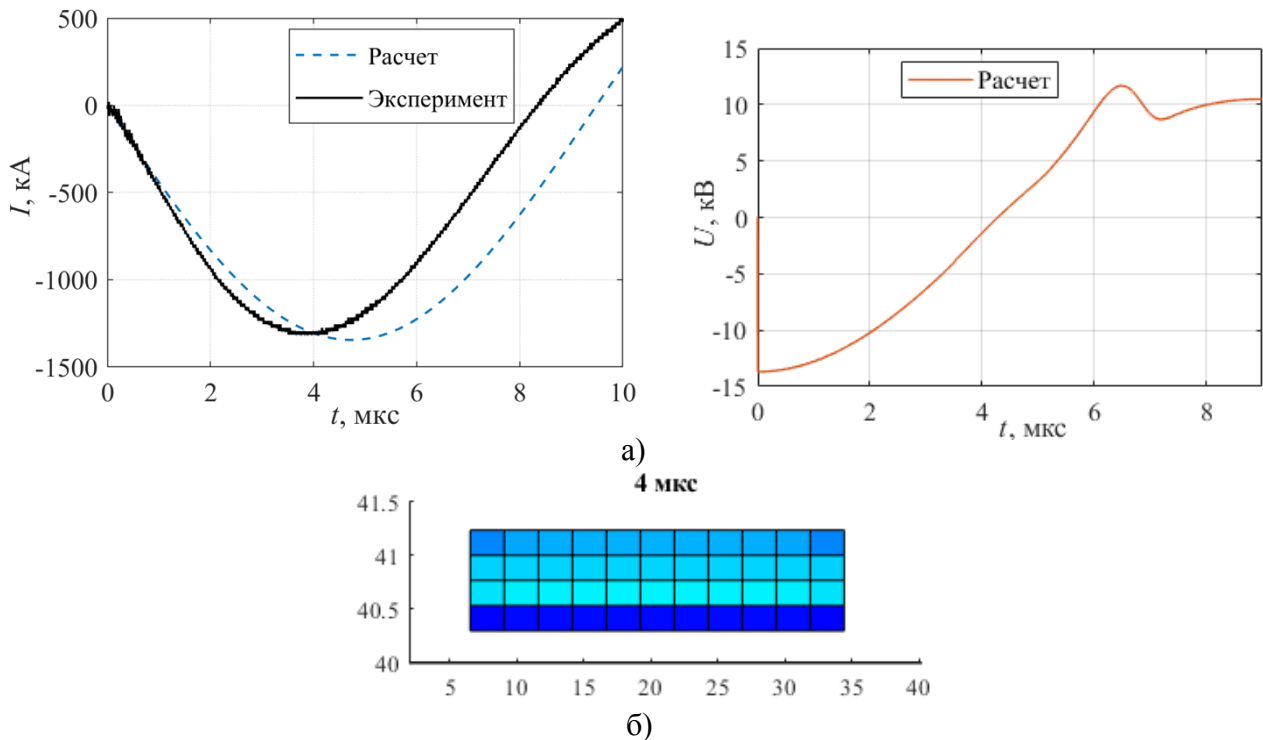


Рис. 8 – Полный ток, напряжение (а) и токи в ЭП пластины (б)  $d = 0,94$  мм,  $b = 27,9$  мм. Расстояние между пластиной и обратным токопроводом 0,3 мм;  $U_0 = 22$  кВ;  $C_0 = 187$  мкФ

Из проведенных оценочных расчетов следует, что с увеличением толщины пластины увеличивается неоднородность распределения тока по ширине пластины.

При быстром нагреве (быстрый электрический взрыв) метод может использоваться для грубых оценок токораспределения во взрываемом проводнике.

### **Заключение**

В работе используется идея замены массивных проводников элементарными витками с одним общим для всех витков системы обратным элементарным проводником.

Метод позволяет непосредственно наблюдать динамику изменения токов в прямом (пластина, фольга) и обратном токопроводах. Приведены результаты двумерного расчета динамики токораспределения в различных плоских геометриях.

Метод применим для взаимно индуктивно связанных систем со слабым нагревом (медленный взрыв, плавление). При быстром нагреве (быстрый электрический взрыв) метод может использоваться для грубых оценок токораспределения во взрываемом проводнике.

Из проведенных оценочных расчетов следует, что с увеличением толщины пластины увеличивается неоднородность распределения тока по ширине пластины.

### *Использованные источники:*

1. Бурцев В.А, Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. Москва: Энергоатомиздат, 1990.
2. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Карнаухова Е.И. Неоднородность формирования волны давления при электрическом взрыве фольги // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Выпуск 2. С. 45–51.
3. Григорьев А.Н., Карнаухова Е.И., Павленко А.В. и др. Влияние материала фольги на однородность механического импульса давления при электрическом взрыве металлических фольг // ПМТФ. 2015. Том 56, № 1. С. 162–170.
4. Шакиров М.А., Кияткин Р.П. Динамика скин-эффекта при разряде ёмкостного накопителя через прямолинейные шины // ЖТФ. 1997. Том 67, № 7. С. 1–7.
5. Кияткин Р.П. Построение схемных моделей для электромагнитных расчетов токоведущих систем, экранов и волноводов: Автореферат дисс. д.т.н. Санкт - Петербург, 2005.
6. Schwenkhagen H. Untersuchung über Stromverdrängung in rechteckigen Querschnitten // Archiv für Elektrotechnik. 1927. Bd. 17, H. 6. S. 537–580.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Данилов Н.Е.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабакхина», Снежинск, Челябинская обл.  
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[dep5@vniitf.ru](mailto:dep5@vniitf.ru)*

### Аннотация

В установках для реализации лазерно-плазменных экспериментов (ЛПЭ) предъявляются жесткие требования к пространственной однородности интенсивности по сечению лазерного пучка. Зачастую они удовлетворяются путём введения в оптический тракт установки пространственного фильтра. В особых случаях, когда в установке для ЛПЭ реализована многопроходная схема усиления лазерного излучения, используются крупноапертурные активные элементы и связанные с ними схемные решения, искажение профиля лазерного пучка невозможно эффективно компенсировать стандартными средствами. Для решения этой проблемы, автором предлагается спроектировать оптико-электронную систему на базе жидкокристаллической матрицы.

В данной работе приведены результаты исследования жидкокристаллических матриц видеопроекторов двух типов, определены их основные оптические характеристики.

*Ключевые слова: лазер, лазерно-плазменный эксперимент, интенсивность лазерного пучка, жидкокристаллическая матрица, оптико-электронная система, формирование пространственного профиля лазерного пучка, интерферометрия.*

## INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF LIQUID-CRYSTAL MATRICES IN RELATION TO AN OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR FORMING SPATIAL PROFILE OF A LASER BEAM

Danilov N.E.

*FSUE «Russian federal nuclear center – All-Russian scientific research institute of technical physics named after academician E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Chelyabinsk district  
FSAEI HE «Shezhinsk physics and engineering institute National research nuclear university MEPI», Chelyabinsk district*

### Abstract

In installations for the implementation of laser plasma experiments (LPE), strict requirements are imposed on the spatial uniformity of intensity along the cross section of the laser beam. They are often satisfied by introducing a spatial filter into the optical path. In special cases, when a multi-pass laser radiation amplification scheme is implemented in the LPE installation, large-aperture active elements and associated circuit solutions are used, distortion of the laser beam profile cannot be effectively compensated by standard means. To solve this problem, the author proposes to design an optoelectronic system based on a liquid crystal matrix. This paper presents the results of a study of liquid crystal matrices of two types of video projectors, their main optical characteristics are determined.

*Keywords: laser, laserplasma experiment, intensity of laser beam, liquid-crystal matrix, optoelectronic system, spatial profile of laser beam forming, interferometry.*

Основу центра лазерно-физических исследований (ЦЛФИ) РФЯЦ-ВНИИТФ составляет ряд импульсных лазерных установок, которые способны генерировать мощные (порядка тераватт) лазерные импульсы в пико- и фемтосекундном диапазонах. Такие импульсы используются в лазерно-плазменных экспериментах для исследований в области

физики высоких плотностей энергии. Также, данные установки могут быть использованы для генерации и ускорения заряженных частиц, генерации нейтронов и ультракоротких импульсов рентгеновского и гамма излучений.

На этапе монтажа и отладки подобных установок возникает ряд проблем, связанных с усилением лазерного излучения и его дальнейшей транспортировкой (особенно в многопроходных схемах). В настоящее время одна из установок ЦЛФИ находится на этапе монтажа и отладки. В ней реализована многопроходная схема усиления и присутствуют крупноапертурные активные элементы, что является причиной появления локальных выбросов интенсивности по профилю лазерного пучка. Для успешной эксплуатации данной установки и проведения на ней экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с веществом необходимо решить эту проблему.

Существуют зарубежные исследования [1], в которых для сглаживания профиля интенсивности лазерного пучка в мощной лазерной установке используется серийно выпускаемый модулятор на базе жидкокристаллической матрицы (ЖКМ). С помощью данного модулятора можно оперативно сформировать практически любой профиль интенсивности лазерного пучка. Однако, приобрести такой модулятор не представляется возможным ввиду неблагоприятной геополитической обстановки. О подобных серийных устройствах от отечественных, или дружественных, производителей на данный момент ничего не известно.

Вместе с тем, ЖКМ очень широко используются в бытовой технике. Например, рынок проекционной видеотехники довольно обширен и доступен. Таким образом, проектирование модулятора на базе ЖКМ от проекционной видеоаппаратуры и его дальнейшее исследование в составе мощной лазерной установки представляется актуальным.

С опорой на исходную зарубежную статью было решено обратить внимание на ЖКМ изготовленные по технологии LCoS. Такие матрицы работают на отражение, и их ключевыми преимуществами (по сравнению с ЖКМ просветного типа) являются: малая дискретность формируемого изображения и большой коэффициент использования полезной площади модуляции.

Для целей исследования была приобретена LCoS матрица HX7027 фирмы Himax. Её паспортные характеристики приведены в таблице 1.

Табл. 1. Паспортные характеристики ЖКМ«HX7027»

Параметр	Значение
Разрешение (W×H)	640×480 пикселей
Размер пикселя (W×H)	13,8×13,8 мкм
Рабочая область (W×H)	8,832×6,624 мм
Коэффициент отражения	82 %
Контрастность	110:1

В первую очередь оценивался заявленный коэффициент отражения и оптическое качество поверхности матрицы на стенде для исследования оптических деталей ЦЛФИ. Все измерения проводились на длине волны  $\lambda_{ли} = 1064$  нм.

Оптическое качество определялось по интерферограммам (рисунок 1), которые были получены на интерферометре Майкельсона в составе стенда. Расшифровка интерферограмм осуществлялась по методике, предложенной автором [2].

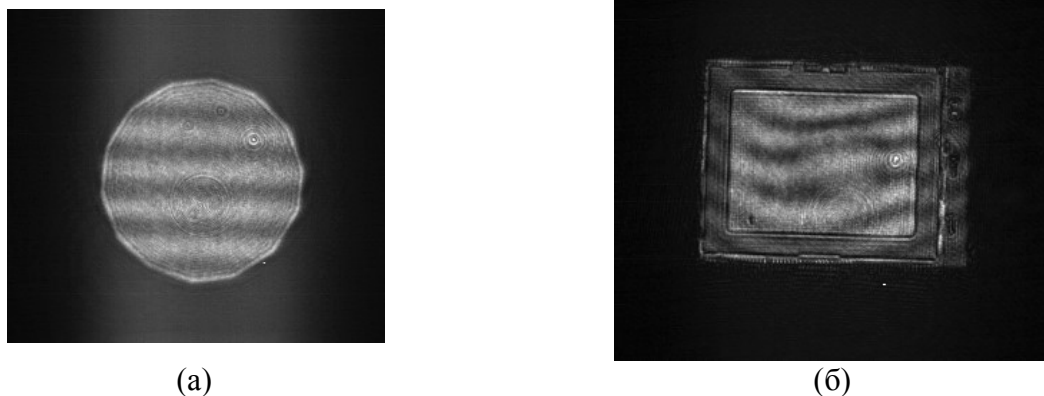


Рис. 1. Результаты интерферометрии ЖКМ «HX7027»: (а) – опорная интерферограмма, (б) – интерферограмма исследуемой матрицы

Опорная интерферограмма отражает искажения волнового фронта лазерного излучения вносимые самим интерферометром. Видно, что они достаточно малы ( $RMS < 0,01 \lambda$ ).

Касательно исследуемой матрицы, она существенно (но не критично) искажает исходный волновой фронт ( $RMS = 0,15 \pm 0,01 \lambda$ ).

Коэффициент отражения определялся по изображениям, представленным на рисунке 2.

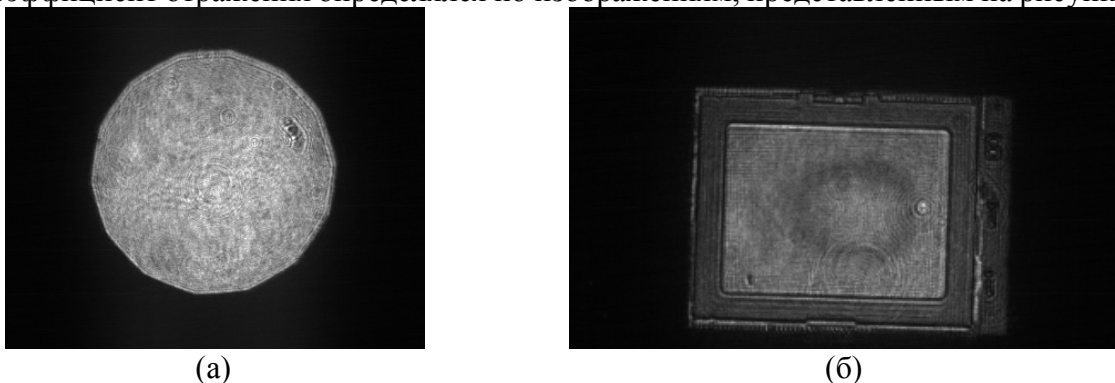


Рис. 2. Изображения эталонного зеркала с  $R = 90\%$  (а) и исследуемой матрицы (б) в отраженном пучке

Коэффициент отражения матрицы определялся по формуле 1.

$$R_{\text{ЖКМ}} = \frac{\overline{I_{\text{ЖКМ}}}}{\overline{I_{\text{эталона}}}} \times R_{\text{эталона}} \quad (1)$$

где  $\overline{I_{\text{ЖКМ}}}$  – среднее количество отсчётов («яркость») по выборке для матрицы,  $\overline{I_{\text{эталона}}}$  – средняя «яркость» по выборке для эталона,  $R_{\text{эталона}}$  – известный коэффициент отражения эталона (90%).

По выборке объемом в десять точек значение коэффициента отражения составляет:

$$R_{\text{ЖКМ}} = 55 \pm 8\%$$

Дальнейшее исследование ЖКМ «HX7027» ограничено объемом доступной документации на данную матрицу. Поэтому, было решено приобрести целый проектор и для целей исследования извлечь ЖКМ вместе с платой управления. В итоге, была получена ЖКМ просветного типа «FPC-RX040H-1400-V0».

Табл. 2. Паспортные характеристики ЖКМ «FPC-RX040H-1400-V0»

Параметр	Значение
Разрешение (W×H)	800×480 пикселей
Размер пикселя (W×H)	108×108 мкм
Рабочая область (W×H)	87×52 мм
Контрастность	1000:1



Измерение контрастности и коэффициента пропускания осуществлялись по изображениям на рисунке 3.

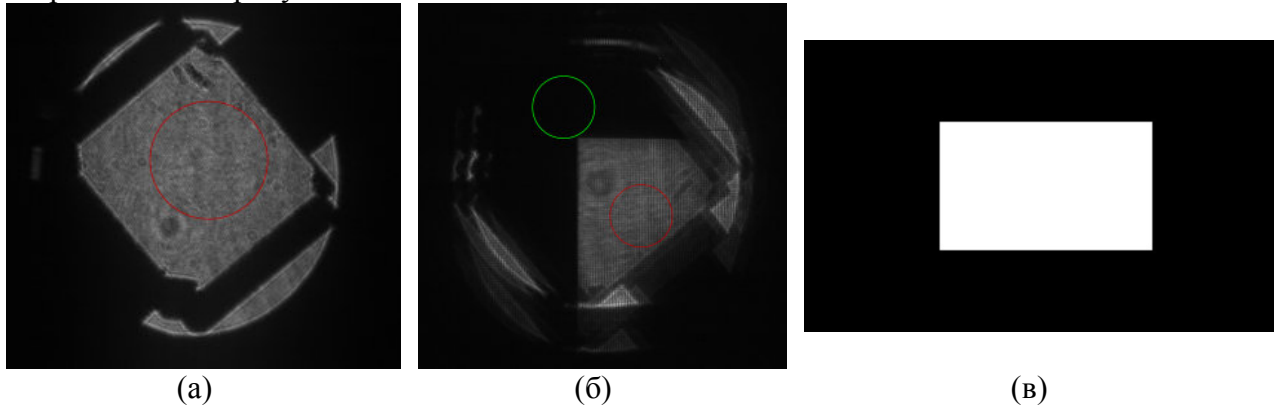


Рис.3. (а) ЖКМ выведена из пучка (экспозиция 10 мс), (б) ЖКМ в пучке (экспозиция 100 мс), (в) тест-изображение, формируемое на ЖКМ

Делались несколько выборок по 10 точек в отмеченных областях (красные и зелёный круги).

Коэффициент пропускания ЖКМ рассчитывался по формуле 2:

$$T = 0,1 \times \frac{I_{avr}^{ЖКМ}}{I_{avr}} \times 100\% \quad (2)$$

где, 0,1 – коэффициент перевода по экспозиции,  $I_{avr}^{ЖКМ}$  – средняя по выборке «яркость» с введённой в пучок ЖКМ (рисунок 3 (б), красный круг),  $I_{avr}$  – средняя по выборке «яркость» без ЖКМ (рисунок 3 (а), красный круг).

Контраст ЖКМ определялся по формуле 3:

$$K = \frac{I_{avr}^B}{I_{avr}^D} \quad (3)$$

где,  $I_{avr}^B$  – средняя по выборке «яркость» светлого участка ЖКМ (рисунок 3 (б), красный круг),  $I_{avr}^D$  – средняя по выборке «яркость» тёмного участка ЖКМ (рисунок 3 (б), зелёный круг).

Получены следующие значения коэффициента пропускания и контраста ЖКМ:

$$T = 8 \pm 1\%$$

$$K = 14 \pm 2 \text{ отн. ед.}$$

На интерферометре Маха-Цендера (в составе стенда) зарегистрированы следующие интерферограммы (рисунок 4).

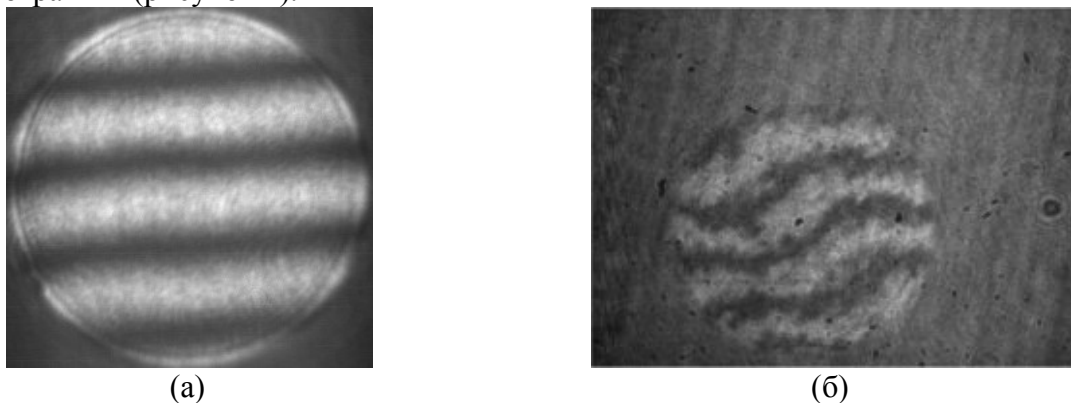


Рис. 4. Результаты интерферометрии ЖКМ «FPC-RX040H-1400-V0»: (а) – опорная интерферограмма, (б) – интерферограмма исследуемой матрицы

Интерферограмма на рисунке 4 (б) соответствует искажению волнового фронта с  $RMS = 0,12 \pm 0,01 \lambda$ .

Данная ЖКМ также вносит существенные искажения пространственного профиля пучка в ближней зоне (рисунок 5).

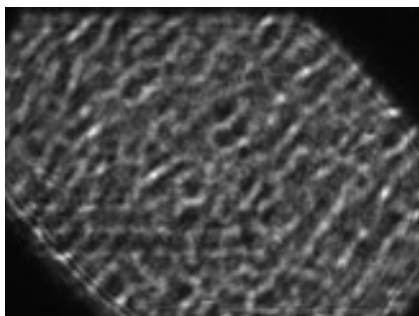


Рис. 5. Искажения пространственного профиля пучка в ближней зоне (в плоскости, смещенной от плоскости изображения ЖКМ)

Полученные результаты в некоторой мере ожидаемы. Так, экспериментальные значения существенно отличаются от паспортных (контраст, коэффициенты отражения/пропускания). Следует понимать, это обусловлено рабочим спектральным диапазоном представленных ЖКМ (с максимумом характеристик в видимой части спектра). Оптическое качество ЖКМ на приемлемом уровне. Впрочем, при необходимости искажения волнового фронта можно компенсировать с помощью адаптивной оптики.

*Использованные источники:*

1. S.-W.Bahk, E. Fess, B. E. Kruschwitz, and J. D. Zuegel «A high-resolution, adaptive beam-shaping system for high-power lasers», OPTICS EXPRESS 18(9) 9151-9163 (2010).
2. Данилов Н.Е. Программное обеспечение для обработки интерферограмм - Наукосфера. №4 (2), 2021.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КАМЕРЫ В УСЛОВИЯХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Доценко В.В., Жабунина О.Ю., Лушина Ю.Ю., Никульшин М.В.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[M.V.Nikulshin@vniitf.ru](mailto:M.V.Nikulshin@vniitf.ru)

В работе рассматривается состояние камеры в условиях действия на неё землетрясения с магнитудой 6 баллов по шкале MSK-64. Численное моделирование выполняется в программе конечно-элементного анализа «ЛОГОС-Прочность», при этом действие землетрясения на камеру моделируется путём задания спектра нагружения в виде зависимости спектральной плотности мощности ускорения от частоты. По результатам расчёта определяются статистические свойства камеры – среднеквадратичные отклонения перемещения и напряжения, и оценивается целостность конструкции. Полученные результаты сравниваются с аналогичным расчётом, выполненным в коммерческом программном обеспечении.

*Ключевые слова: камера, землетрясение, собственная частота, случайная вибрация, спектральная плотность мощности ускорения, среднеквадратичное отклонение перемещения, среднеквадратичное отклонение напряжения.*

### NUMERICAL SIMULATION OF THE CHAMBER CONDITION UNDER EARTHQUAKE

Dotsenko V.V., Zhabunina O.Yu, Lushina Yu.Yu, Nikulshin M.V.  
FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Chelyabinsk region  
[M.V.Nikulshin@vniitf.ru](mailto:M.V.Nikulshin@vniitf.ru)

The condition of a chamber exposed to an earthquake with a magnitude of 6 on MSK-64 scale is considered. Numerical simulation is performed using LOGOS-Prochnost (LOGOS-Strength) code based on finite-element analysis. The earthquake effect on the chamber is simulated by defining loading spectrum as a dependence of acceleration power spectral density on frequency. The calculation results are used to determine statistic chamber properties, i.e. root-mean-square displacement and root-mean-square stress, and to estimate the structure integrity. The obtained results are compared with the similar calculation performed with commercially available software.

*Keywords: chamber, earthquake, intrinsic frequency, random vibration, acceleration power spectral density, root-mean-square displacement, root-mean-square stress.*

Для проведения исследований характеристик горения водородосодержащих газовых смесей предполагается использование специально разработанной камеры, которая представляет собой длинномерную конструкцию квадратного сечения высотой около 13 м массой 12 т, установленную в вертикальном положении (рисунок 1). Она содержит четыре сварные секции квадратного сечения (поз. 1), крышку (поз. 2), дно (поз. 3) и опору (поз. 4), состоящую из сваренных между собой пластин. Для изготовления секций, крышки и дна используется сталь 12X18H10T, а для опоры – сталь 09Г2С.

Одним из требований к камере является сохранение её целостности при возможном воздействии землетрясения с магнитудой 6 баллов по шкале MSK-64.

Возможность численного моделирования состояния конструкции в условиях действия сейсмических нагрузок предусмотрена в программе «ЛОГОС-Прочность» [1] (далее – «ЛОГОС»), позволяющей решать различные задачи прочности. При этом расчёт на воздействие землетрясения может проводиться двумя методами в зависимости от способа моделирования сейсмической нагрузки. При первом методе выполняется динамический

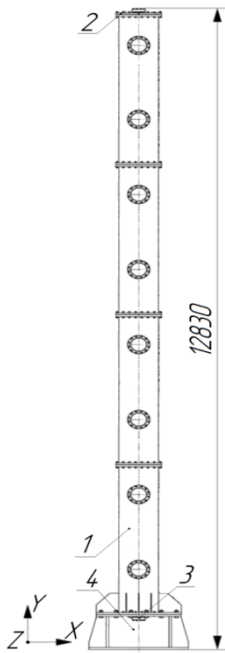


Рис. 1. Схема камеры

расчёт конструкции, в котором действующая нагрузка задается в виде акселерограммы – зависимости ускорения от времени  $a(t)$ . При втором методе проводится расчёт случайной вибрации, и нагрузка в этом случае прикладывается в виде спектра нагружения, заданного зависимостью спектральной плотности мощности (СПМ) ускорения от частоты  $S(f)$ .

С целью оптимизации расчёта камеры с точки зрения времени выполнения задачи выбран второй метод расчёта. Параметры сейсмического воздействия на камеру принимались по стандарту [2], где приведены зависимости максимальной амплитуды ускорения в горизонтальном направлении от частоты вибрации  $a_{max}(f)$  при различных интенсивностях землетрясений. В вертикальном направлении значения ускорений принимаются равными 0.7 от значений для горизонтального направления. При этом следует учитывать, что на камеру одновременно действуют нагрузки (ускорения) в вертикальном и одном из двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлениях.

Зависимости  $a_{max}(f)$  в горизонтальном и вертикальном направлениях были преобразованы в спектры нагружения по формуле:

$$S = \frac{a_{max}^2}{g^2 \cdot \Delta f}, \quad (1)$$

где  $S$  – СПМ ускорения в горизонтальном или вертикальном направлении,  $g^2/\text{Гц}$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ ;

$\Delta f$  – полоса частот, Гц.

Полученные зависимости  $S(f)$ , задаваемые в программе «ЛОГОС» при проведении расчёта, приведены на рисунке 2.

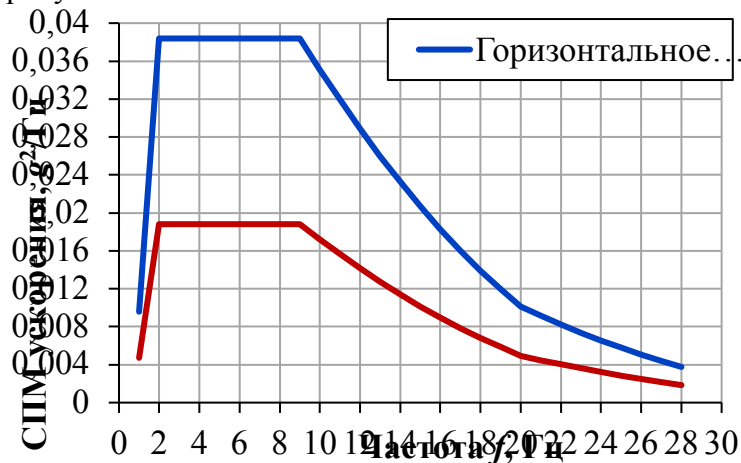


Рис. 2. Зависимости  $S(f)$  в горизонтальном и вертикальном направлениях при землетрясении с магнитудой 6 баллов (спектры нагружения)

Расчётная модель камеры представлена на рисунке 3. Для материалов камеры задана упругая модель.

Расчёт камеры в условиях действия спектров нагружений проводился в два этапа:

– определение собственных частот и форм колебаний конструкции;

– проведение анализа случайной вибрации при заданных спектрах нагружений (рисунок 2).

По результатам модального расчёта получено, что низшие собственные частоты камеры обусловлены её поперечными колебаниями. Первая собственная частота  $f_1 = 3.2 \text{ Гц}$  соответствует колебаниям вдоль оси Z, вторая частота  $f_1 = 3.8 \text{ Гц}$  – колебаниям вдоль оси X. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами модального расчёта,

выполненного факультативно в коммерческом программном обеспечении (КПО): отличие не более 6 %.

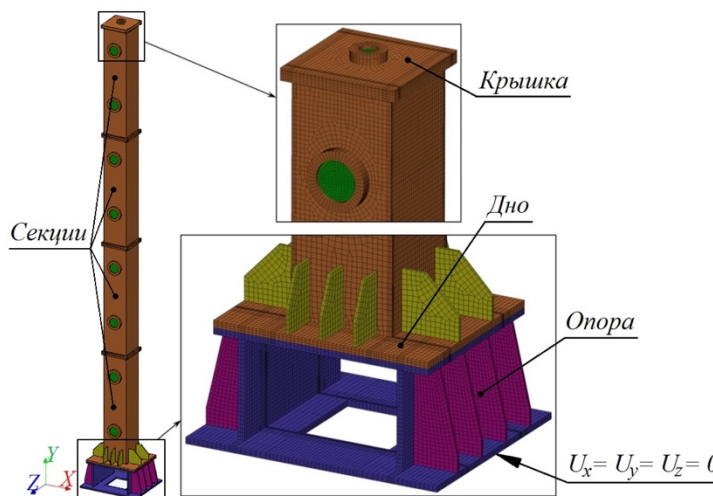


Рис. 3. Расчётная модель камеры

При действии спектров нагрузжений наибольшее значение среднеквадратичного отклонения (СКО) перемещений составляет 62 мм для верхнего торца камеры (рисунок 4). СКО напряжений достигают предел текучести материала ( $\sigma_m = 235$  МПа) в локальных зонах стыка нижней секции камеры с её ребрами (рисунок 5), остальная часть камеры работает упруго. Аналогичные результаты получены в КПО: отличие не более 3 % по перемещениям.

Таким образом, целостность камеры при возможном воздействии землетрясения с магнитудой 6 баллов сохраняется, в локальных областях стыков нижней секции с ребрами возможно образование зон пластичности.

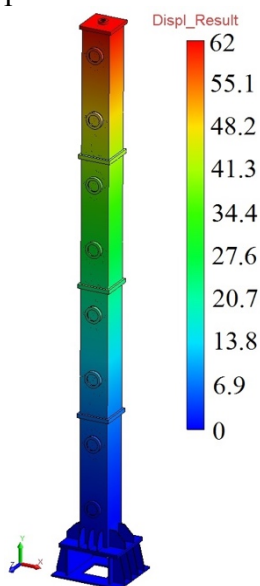


Рис. 4. Распределение СКО перемещений в камере, мм

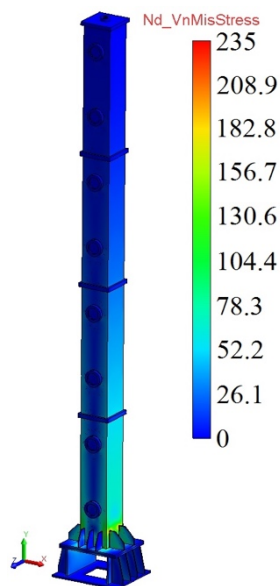


Рис. 5. Распределение СКО эквивалентных напряжений в камере, МПа

*Использованные источники:*

- 1 Руководство по использованию программного комплекса «ЛОГОС» версии 5.3.19.
- 2 ГОСТ 30546.1-98. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчёта их сложных конструкций в части сейсмостойкости. Межгосударственный стандарт [Текст]. – Введ. 1999-07-01. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1999.

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР УДАРНОГО СЖАТИЯ ТЭНА

Ковалев Ю.М., Шестаков М.А.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск,  
Челябинская обл.  
[yum\\_kovf@mail.ru](mailto:yum_kovf@mail.ru)

В данной работе предлагается подход к определению температур ударного сжатия ВВ, на примере ТЭНа, путем расчета распространения в них стационарной ударной волны. Предлагаемый подход позволяет построить ударные адиабаты энергетических материалов и провести анализ влияния различных выражений для описания зависимости теплоемкости при постоянном объеме от температуры на величину температуры ударно-волнового сжатия энергетических материалов.

*Ключевые слова:* уравнение состояния, ударное сжатие, ударная адиабата, коэффициент Грюнайзена, температура.

## CALCULATION OF SHOCK COMPRESSION TEMPERATURES OF PENT

Kovalev Yu.M., Shestakov M.A.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
[yum\\_kovf@mail.ru](mailto:yum_kovf@mail.ru)

In this paper, an approach is proposed to determine the temperatures of shock compression of explosives, using the example of PENT, by calculating the propagation of a stationary shock wave in them. The proposed approach makes it possible to construct shock adiabats of energy materials and analyze the influence of various expressions to describe the dependence of the heat capacity at a constant volume on temperature on the value of the shock wave compression temperature of energy materials.

*Keywords:* equation of state, shock compression, shock adiabatic, Gruneisen coefficient, temperature.

Глубокое понимание процессов инициирования и распространения детонации невозможно без исследования различных аспектов динамического сжатия взрывчатого вещества (ВВ) и его термодинамических свойств. Процессы, протекающие при воздействии ударных волн на ВВ, представляют большой, как практический, так и теоретический интерес и являются объектом многочисленных исследований [1]. Если динамические свойства исходных веществ, составляющих взрывчатую систему, определены, то исследователь и изготовитель могут заранее предсказывать свойства этих систем. В данных исследованиях одной из актуальных проблем является проблема ударно-волнового разогрева ВВ. Это связано с тем, что кинетика ударно-волнового инициирования детонации конденсированных ВВ существенным образом зависит от температуры, возникающей после прохождения по нему ударной волны. Для ВВ построить ударную адиабату в широком диапазоне давлений не представляется возможным, так как при ударно-волновом сжатии возможно инициирование детонации. Поэтому актуальными становятся подходы, позволяющие осуществлять переход от экспериментальных данных по изотермическому сжатию к ударным адиабатам и построение уравнений состояния конденсированных ВВ, позволяющих определять температуру ударного сжатия материала. В качестве объекта исследования был выбран пентаэритриттетранитрат (ТЭН) в силу того, что для кристалла ТЭНа есть экспериментальная ударная адиабата [2].



### Метод расчета температур ударного сжатия

Для расчета температур ударного сжатия рассмотрим распространение стационарной ударной в ТЭНе. Система уравнений газовой динамики, описывающая распространение ударной волны, в лагранжевых переменных  $h, t$  имеет следующий вид:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right) - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial u}{\partial h}\right) = 0; \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial p}{\partial h}\right) = 0; \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right) + \frac{p}{\rho_0} \left(\frac{\partial u}{\partial h}\right) = 0; \quad (3)$$

где  $\rho_0$  является начальной плотностью,  $u$  скорость частиц,  $v$  удельный объем,  $p$  давление в направлении распространения и  $E$  внутренняя энергия. Данная система законов сохранения замыкается уравнениями состояния, которые имеют следующий вид [3,4]:

$$P = \frac{MRT\gamma_D(V)}{V} D(x_D) + P_x, \quad P_x = -\frac{\partial U_C}{\partial V} - \frac{\partial U_M}{\partial V} + \frac{3}{8} MRT\gamma_D(V)x_D / V \quad (4)$$

$$E = U_C + U_M + E_0 + E_T, \quad (5)$$

где  $M$  - количество деформационных колебаний, метод определения описан в работе [5],  $R$  - универсальная газовая постоянная, поделенная на молекулярную массу  $ВВ$ ,  $T$  - температура,  $\gamma_D$  - коэффициент Грюнайзена,  $D(x_D)$  - функция Дебая,  $x_D$  - безразмерная характеристическая температура Дебая,  $U_C$  - межмолекулярная (упругая) составляющая внутренней энергии, которая определяет энергию не валентных взаимодействий атомов между молекулами,  $U_M$  - внутримолекулярная составляющая внутренней энергии, определяющая энергию взаимодействия атомов внутри молекулы,  $E_0$  - энергия нулевых колебаний,  $E_T$  - тепловая составляющая внутренней энергии,  $P_x$  - «холодная» составляющая давления. Выражения для «холодных» составляющих, входящих в уравнения состояния (4) и (5), были определены в работах [3,4].

Уравнение внутренней энергии (3) в результате простых преобразований можно представить следующим образом:

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} + (P_T + P_x + \left(\frac{\partial(U_C + U_M + E_0)}{\partial V}\right)_T) \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \quad P_T = \alpha K_{T_0} T + P_0,$$

или же

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} + P_T \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

где  $C_V$  - теплоемкость при постоянном объеме,  $\alpha$  - коэффициент объемного расширения,  $K_{T_0}$  - изотермический модуль сжатия,  $P_0$  - давление при нормальных условиях.

Система уравнений (1), (2), (6) решалась методом Неймана-Рихтмайера. При проведении расчетов для теплоемкости при постоянном объеме были использованы два выражения - через частоты нормальных колебаний [6]:

$$C_V = MRD_c(x_D) + R \sum_{i=M+1}^{3N} \frac{x_i^2 \exp(x_i)}{(\exp(x_i) - 1)^2}. \quad (7)$$

и через аппроксимационную зависимость [6,7]:

$$C_V / C_{VH} = 1 - (1 - C_V^0 / C_{VH}) \exp[-(T - T) / T_c], \quad (8)$$

где  $x_i$  - безразмерная характеристическая температура внутримолекулярных колебаний,  $D_c(x_D)$  - функция теплоемкости Дебая,  $C_{VH} = 3NR$ ,  $N$  - количество атомов в молекуле,  $C_V^0$  - значение теплоемкости при постоянном объеме при начальной температуре,  $T_c$  - параметр, определенный в работе [7], для ряда органических соединений.

Контроль выполнения условий Гюгонио осуществлялся путем сравнения значений изменения внутренней энергии, полученной в расчетах:

$$\Delta E = 3K_{T_0} \left( \frac{1}{(n+1/3)} (x^{-(n+1/3)} - 1) - \frac{1}{n} (x^{-n} - 1) \right) / \rho_0 - (\alpha K_{T_0} T_0 - P_0)(1-x) / \rho_0 + \Delta E_{T_1},$$

$$\Delta E_{T_1} = C_{VH}(T - T_0) + T_c(C_{VH} - C_V^0)(\exp(-(T - T_0) / T_c) - 1),$$

$$\Delta E_{T_2} = MR(T - T_0) + RT \sum_{i=M+1}^{3N} \frac{x_i}{\exp(x_i) - 1} - E_{T_0}, \quad E_{T_0} = RT_0 \sum_{i=M+1}^{3N} \frac{x_i^0}{\exp(x_i^0) - 1}, \quad x_i^0 = \theta_i / T_0$$

и на ударной адиабате:

$$\Delta E_{SH} = 0.5P(1-x) / \rho_0.$$

Результаты расчетов температур ударно-волнового сжатия ТЭНа для разных выражений теплоемкости при постоянном давлении приведены в табл. 1.

Таблица 1  
 Расчет температур ударно-волнового сжатия ТЭНа

$u$ , км/с	$P_1$ , ГПа	$T_1$ , К	$T_2$ , К	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>
0,1532	0,76	314,3	314,0	1881,5	1881,6
0,4158	2,48	354,6	353,8	2029,2	2029,3
0,5935	3,93	391,3	390,0	2114,5	2114,6
0,7342	5,24	427,0	425,3	2176,2	2176,2
0,8838	6,77	471,7	469,4	2237,0	2237,2
0,9882	7,92	506,9	504,2	2277,1	2277,3
1,0593	8,75	532,7	529,7	2303,5	2303,6
1,1091	9,34	551,6	548,4	2321,5	2321,6
1,2405	10,99	604,9	601,2	2367,4	2367,6
1,2595	11,24	612,9	609,2	2373,8	2374,0

Результаты, представленные в табл. 1. показывают, что различие между температурами, рассчитанными по различным выражениям для теплоемкости, составляет не более четырех градусов. Поэтому при расчетах температур ударно-волнового сжатия целесообразно использовать выражение (8) не привлекая сложные квантово-химические расчеты частот нормальных колебаний.

*Использованные источники:*

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. Москва: Янус - К, 1966. – 408 с.
2. Marsh S.P. LASL Shock Hugoniot Data. Los Angeles: University of California Press, 1980.
3. Ковалев, Ю.М. Уравнения состояния для описания изотермического сжатия некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений / Ю.М. Ковалев// Инженерно-физический журнал. - 2020. - Т. 93, № 1. - С. 229-239.

4. Ковалев, Ю.М. Уравнения состояния для расчета давлений ударно-волнового сжатия пентаэритриттетранитрата (ТЭНа) / Ю.М. Ковалев, Е.В. Помыкалов // Инженерно-физический журнал. - 2023. - Т. 96, № 4. - С. 1053-1061.
5. Ковалев, Ю.М. Определение температурной зависимости изобарического коэффициента объемного расширения для некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений / Ю.М. Ковалев// Инженерно-физический журнал. - 2018. - Т. 91, № 6. - С. 1653-1663.
6. Ковалев, Ю.М. Определение температурной зависимости теплоемкости для некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений / Ю.М. Ковалев, В.Ф. Куропатенко // Инженерно-физический журнал. - 2018. - Т. 91, № 2. - С. 297-306.
7. Щетинин, В.Г. Расчет теплоемкости органических веществ в ударных и детонационных волнах / В. Г. Щетинин // Химическая физика. 1999. - Т. 18, № 5. - С. 90 – 95.

## РАСЧЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ВОДОРОДОМ СТЕНДА КУПОЛ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

Кутузова К.С., Безгодов Е.В., Попов И.А., Пасюков С.Д.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», Снежинск, Челябинская обл.  
[kutuzovaks@vniitf.ru](mailto:kutuzovaks@vniitf.ru)

В ходе данной работы было проведено численное моделирование истечения водорода в стенд КУПОЛ. Численное моделирование являлось расчетно-теоретическим обоснованием постановки эксперимента, в котором осуществлялось истечение водорода с постоянным расходом в стенд объемом 134 м<sup>3</sup> с двумя вентиляционными окнами. В результате проведенных расчетов были получены зависимости объемной доли водорода в некоторых точках стенда КУПОЛ. Качественно результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

*Ключевые слова: водород, водородная безопасность, численное моделирование, истечение.*

## NUMERICAL OPTIMIZATION OF PROCESS OF STAND KUPOL HYDROGEN FILLING FOR SUPPORT OF EXPERIMENT REQUIREMENTS

Kutuzova K.S., Bezgodov E.V., Popov I.A., Pasyukov S.D.  
FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia  
[kutuzovaks@vniitf.ru](mailto:kutuzovaks@vniitf.ru)

In this work numerical simulation of hydrogen leakage in stand KUPOL was performed. Numerical simulation reproduces one of experimental investigation hydrogen leakage in 134 m<sup>3</sup> stand with vented windows. As a result of the calculations the dependences of the hydrogen volume fraction at the control points of the stand KUPOL were performed. Qualitatively, the simulation results agree with the experimental data.

*Keywords: hydrogen, hydrogen safety, numerical simulation, leakage.*

Обеспечение безопасности при производстве и хранении водорода является актуальной задачей для развивающейся водородной энергетики. Оборудование площадок производства водорода, в основном, размещаются в открытом пространстве вне зданий и помещений. В случае аварии могут образовываться области, содержащие горючую водородно-воздушную смесь, взрыв которой может привести к разрушению близлежащих конструкций. Для оценки взрывных воздействий в РФЯЦ-ВНИИТФ было запланировано проведение экспериментов с горением смесей водород-воздух в большом масштабе на стенде КУПОЛ, представляющим собой полусферу диаметром 8 м. Одной из задач эксперимента являлось создание около стехиометрического состава водорода в воздухе в стенде до момента воспламенения. Для снижения затрат в рамках отработки технических устройств, обеспечивающих равномерно перемешанную смесь, решено провести серию расчетов.

Основной целью данной работы являлся поиск способа подачи водородосодержащей смеси в стенд КУПОЛ для создания равномерно перемешанной смеси с применением CFD-кода. А именно необходимо расчетно определить оптимальный размер, геометрию, расположение трубопровода и вентиляционных отверстий для обеспечения равномерного заполнения водородно-воздушной смесью с содержанием водорода 30 % в объеме стенда. Критерием равномерного заполнения стенда являлось достижение 30 % содержания водорода в различных контрольных точках менее чем за 2,5 часа.

Задачи:

- создание расчетной модели стенда КУПОЛ,
- выбор параметров расчета (физические модели, параметры сеточные модели), поиск оптимального размера и геометрии трубопровода для подачи газа,
- варьирование вентиляционного отверстия,
- прогнозирование содержания водорода в объеме стенда,
- определение времени установления требуемого состава водород-воздушной смеси.

Стенд КУПОЛ представляет собой полусферу радиусом 4 м, с рабочим объемом 134 м<sup>3</sup> (см. рисунок 1). Внутри располагается трубопровод для подачи газа, а в нижней части стенда расположены два вентиляционных отверстия.

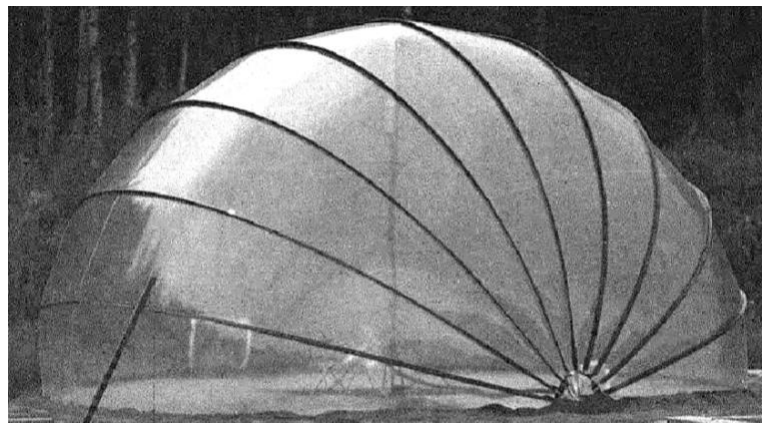


Рисунок 1 — Стенд КУПОЛ

Геометрия расчетной области показана на рисунке 1. Моделировалась четверть полусферы в симметричной постановке с одним вентиляционным отверстием. Внутренний объем стенда задан как жесткая стенка. Внутри стенда проведен трубопровод, через который подавался газ с постоянным расходом. На входной границе задавался массовый расход водорода. Добавлена внешняя область для моделирования потока, выходящего через отверстия в окружающую среду. Отверстие расположено снизу стенда и сообщается с окружающей атмосферой. На внешнем объеме расчетной области — свободное протекание.

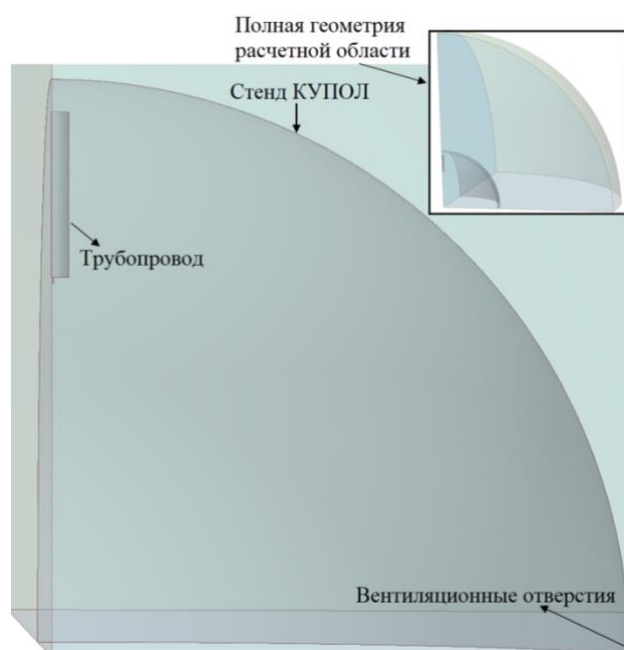


Рисунок 2 — Пример геометрии расчетной области

Для решения применялась система газодинамических уравнений, состоящая из уравнений сохранения массы, импульса, энергии и состояния идеального газа. Система уравнений решалась в приближении малой сжимаемости в неявном виде с применением итерационного метода [1]. Газовая среда представлена многокомпонентной смесью. Для каждого компонента смеси решалось уравнение переноса. Расчет нестационарный, трехмерный. Шаг интегрирования системы варьировался в интервале 0,001—0,1. Число итераций на шаг интегрирования задавалось равным 20. Для моделирования турбулентности использовалась  $k$ — $\varepsilon$ -модель [2].

В уравнениях концентрации компонентов были учтены диффузионные члены. Динамическая вязкость и теплопроводность многокомпонентной газовой смеси рассчитывались по молекулярно-кинетическим соотношениям с использованием метода усреднения [3]. Модель также учитывала влияние силы тяжести.

В расчетах фиксировались значения концентрации водорода в контрольных точках, которые расположены в некоторых точках стенда, значение давления окружающей среды.

В первой части работы проводились расчеты четырех вариантов расположения и диаметра трубопровода, по результатам которых был выбран трубопровод, расположенный на высоте 2800 мм. Схема геометрии трубопровода показана на рисунке 3.

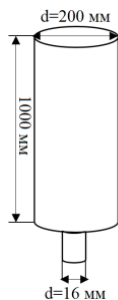


Рисунок 3 — Схема геометрии трубопровода

Во второй части работы на основе оптимизированной геометрической модели была построена сеточная модель. В целях исследования сеточной сходимости были проведены расчеты при различных разбиениях расчетной области. Оптимальной являлась сетка с размером ячейки 0,05 м.

В третьей части работы было проведено два расчета по заполнению стенда, в которых диаметр вентиляционного отверстия был равен 125 и 250 мм. При заполнении менее чем за 2,5 часа более равномерное распределение водорода с содержанием близким к 30 % наблюдалось в расчете с диаметром вентиляционного отверстия 125 мм.

По результатам расчетного исследования был определен оптимальный режим заполнения стенда КУПОЛ, а также определено время полного замещения воздуха водородно-воздушной смесью в стенде. Оптимальные размеры и расположение трубопровода и диаметр вентиляционных отверстий были рекомендованы для проведения экспериментов с горением водородно-воздушной смеси в открытом пространстве. По результатам экспериментов было проведено сравнение с расчетом, которое показало хорошие согласие.

*Использованные источники:*

1. OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox / User Guide 2016
2. Jones W.P., Launder B.E. The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence // Heat and Mass Transfer. (1972). – № 15. – P. 301–314
3. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – Москва: Физматлит, 2003. – 352 с.



## РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТОКОНЕСУЩЕЙ СИСТЕМЕ «ФЛАЕР – ОБРАТНЫЙ ТОКОПРОВОД»

Лубенченко Н.А.<sup>1,2</sup>, Григорьев А.Н.<sup>1</sup>, Строков А.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.

Приведены результаты расчета распределения магнитного поля по закону Био-Савара-Лапласа. Найдено распределения магнитного поля для разных конфигураций «флаер – обратный токопровод». Показаны возможности по максимизации  $H_x$  компоненты поля.

*Ключевые слова:* Флаер, токопровод, магнитное поле.

## CALCULATION OF THE MAGNETIC FIELD IN A CURRENT-CARRYING SYSTEM "FLYER - RETURN CONDUCTOR"

Lubenchenko N.A.<sup>1,2</sup>, Grigoriev A.N.<sup>1</sup>, Stokov A.D.<sup>1</sup>

*IFGUP "RFNC VNIITF named after Academician E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Russia. E.I. Zababakhin", Snezhinsk.*

*2 SFTI MEPhI, Snezhinsk, Russia.*

The results of calculation of magnetic field distribution according to the Bio-Savara-Laplace law are presented. Magnetic field distributions for different configurations "flyer - reverse current conductor" are found. Possibilities of maximizing the  $H_x$  component of the field are shown.

*Keywords:* Flyer, current conduit, magnetic field.

### Введение

Возможность разгона пластин-ударников (флаеров, рисунок 1) до скоростей  $V > 8$  км/с с помощью импульсного магнитного поля послужила стимулом для применения и соответствующего развития мощной импульсной электрофизической техники в задачах исследования динамических свойств материалов [1, 2].

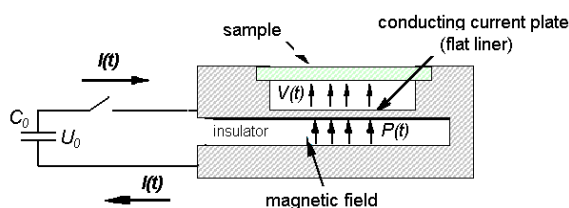
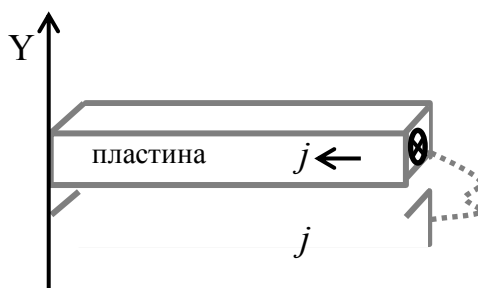


Рисунок 1 – Пример схемы нагружения образцов ударником, где ударником служит флаер

### Расчет поля пластины с однородным током двумерная постановка

Краткая постановка задачи:





Для оценки влияние геометрии обратного токопровода на распределение тока в проводниках, была решена задача, связанная с нахождением магнитных полей в двумерной постановке вокруг тонкого фляера толщиной 1 мм и шириной 30 мм, где размер вдоль оси Z равен бесконечности. В такой постановке можно пренебречь z-компонентой  $H_z$  для поля  $H$ .

Были получены формулы для расчета x- и y-компонент полей в двумерной и трехмерной постановке из закона Био-Савара-Лапласа (1)-(3). Ток в обратном токопроводе в расчетах со направлен с осью Z и противоположно направлен во фляере [3].

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{I} [d\vec{r} \times \vec{r}]}{r^3} \quad (1)$$

$$H_x(t, u) = \frac{1}{4\pi} \iint \frac{-I(x, y) \cdot (u - y)}{|r|^3} dx dy \quad (2)$$

$$H_y(t, u) = \frac{1}{4\pi} \iint \frac{I(x, y) \cdot (t - x)}{|r|^3} dx dy, \quad (3)$$

где  $|r| = \sqrt{(t-x)^2 + (u-y)^2 + (w-z)^{2\nu}}$  ( $\nu=0$  – в случае двумерной постановки и  $\nu=1$  – в случае трехмерной постановки задачи),  $I(x, y)$  – распределение плотности тока в проводниках (направление тока совпадает с осью z; положительное направление выбрано для обратного токопровода),  $x, y, z$  – координаты связанные с проводниками тока,  $t, u, w$  – координаты связанные с областью вокруг проводников с током (точки наблюдения).

На рисунке 2, 3, 4 представлены векторные поля напряженности магнитного поля  $H$ , рассчитанные по формулам (2) и (3). Плотность тока и область протекания отличается от случая к случаю, но суммарный ток, протекающий по проводнику остается постоянным.

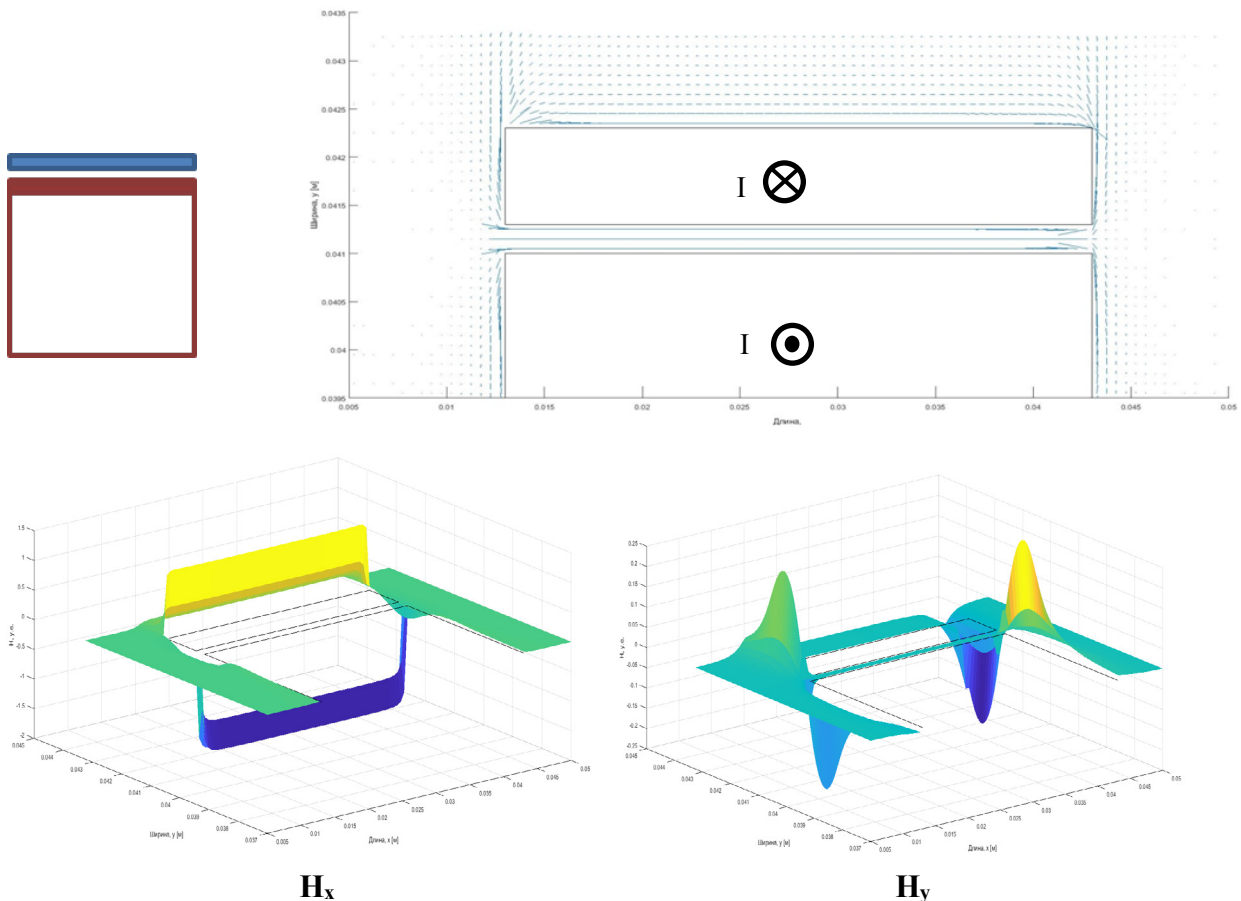


Рисунок 2 – Векторное поле  $H$ . Ток протекает в ОТ в слое равном толщине фляера

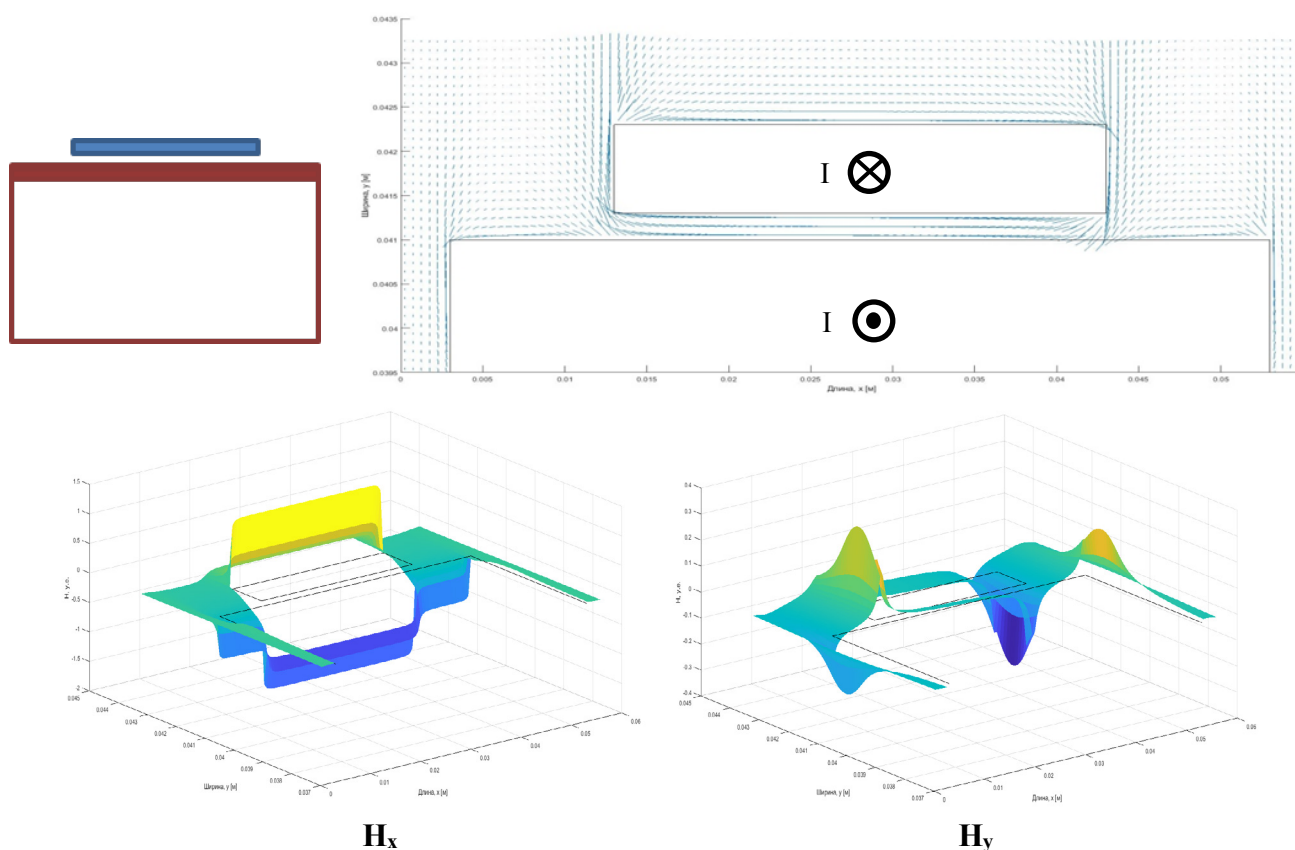
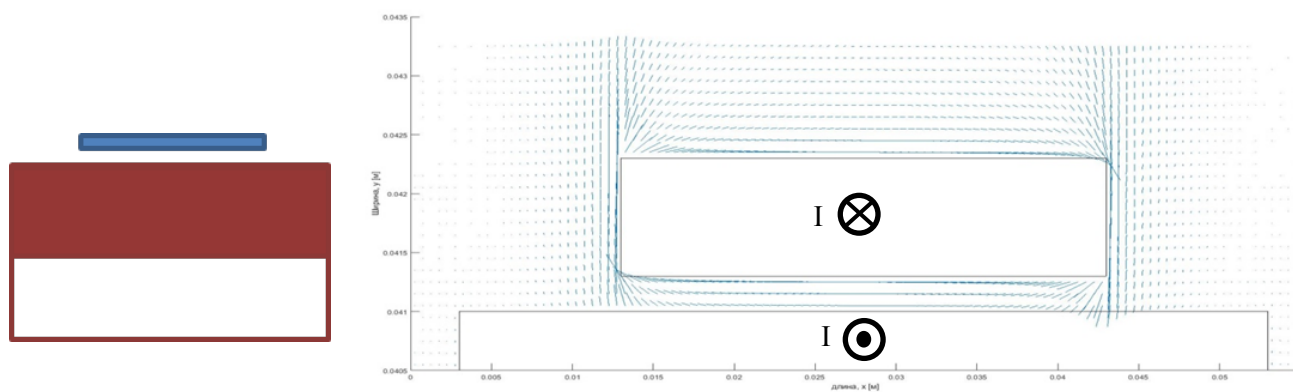


Рисунок 3 – Векторное поле  $H$ . Ток протекает в ОТ в слое равной толщине фляера

Из сравнения рисунков 3 и 4 видно, что в случае тонкого скин-слоя в обратном токопроводе (ОТ) (рисунок 3) происходит увеличение  $H_x$  компоненты магнитного поля в зазоре «фляер – ОТ» по сравнению со случаем, когда скин-слой занимает половину толщины ОТ (рисунок 4). В связи с чем, для увеличения  $H_x$  компоненты магнитного поля (работающей на ускорение фляера) следует минимизировать скин-слой в ОТ. Поэтому обратный токопровод необходимо изготавливать из меди (в настоящее время изготавливается из стали). При использовании стали необходимо использовать немагнитную сталь (магнитная проницаемость  $\mu_{Fe} > \mu_{Cu}$ , удельное сопротивление  $\rho_{Fe} > \rho_{Cu}$ )



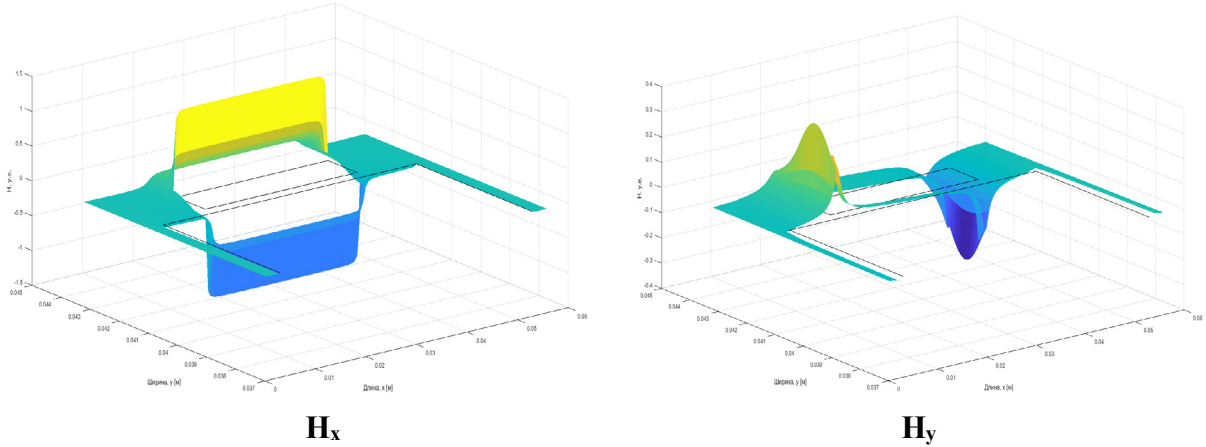
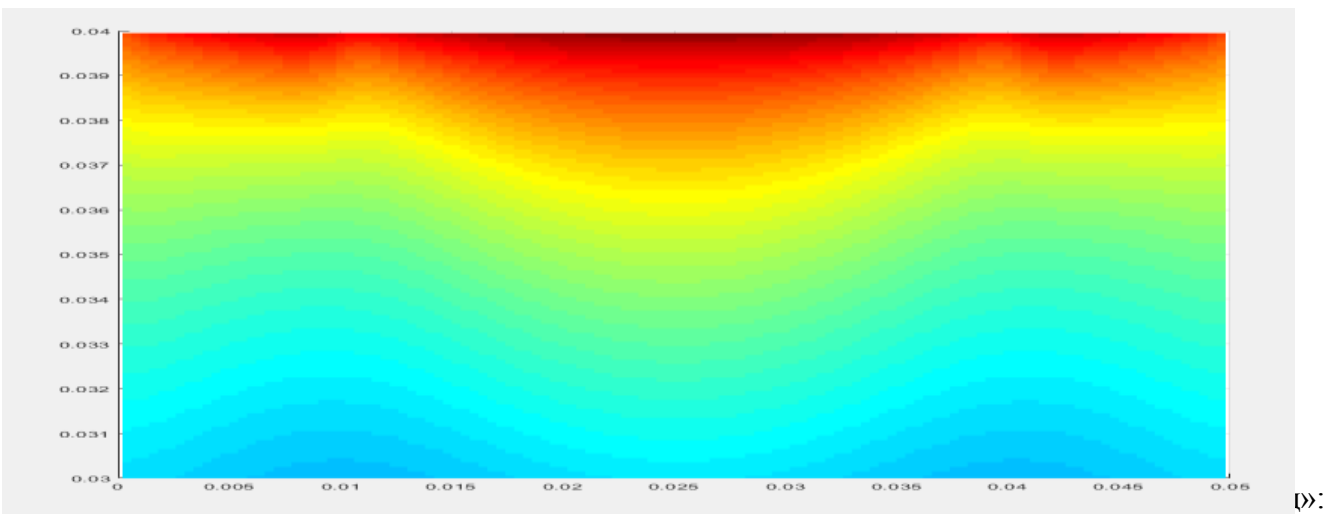
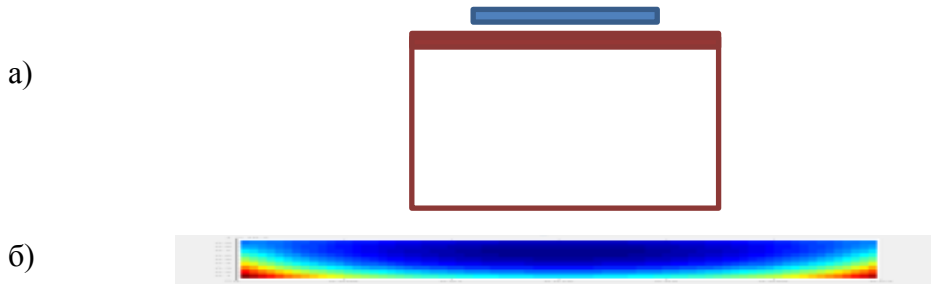


Рисунок 4 – Векторное поле  $H$ . Ток протекает в слое равном половине толщины обратного токопровода (половина обратного токопровода).

Также была решена обратная задача – распределение тока в проводнике или его смещение по известному распределению поля  $H$ . Результат, представленный на рисунке 5, был получен в приближении массива тонких бесконечных проводников круглого сечения, для которых и была решена задача оценки распределения тока по известному магнитному полю вне проводников.

$$I = 2\pi rB \approx 2\pi rH \quad (4)$$



а) начальное приближение; б) распределение тока, полученное в расчете

### Расчет поля пластины в трехмерной постановке с однородным током

В данном разделе представлены результаты численного моделирования магнитных полей, создаваемых при протекании тока в системе «флаер – обратный токопровод». Поля найдены из закона Био-Савара-Лапласа с учетом геометрии проводников в трехмерной постановке по следующим формулам (2), (3) для  $x$ - ( $H_x$ ) и  $y$ -компонент ( $H_y$ ) магнитного поля.

Моделировался ток равномерно распределенный по всему сечению флаера. Была выбрана постановка согласно рисунку 2.

Расположение флаера и обратного токопровода (ОТ) в системе координат  $XYZ$  приведено на рисунке 6.

Исследовалось изменение распределения поля вокруг флаера в двух постановках задачи:

- 1) при неизменной толщине слоя (в нашей терминологии длина флаера или  $L$ ) вдоль направления оси  $Z$  (ток течет вдоль оси  $Z$ ), но переменном количестве ячеек по толщине ( $dl \neq const$ );
- 2) при неизменной толщине ячейки вдоль  $Z$  ( $dl = const$ ), но при переменном количестве ячеек, т.е. при переменной толщине слоя ( $L \neq const$ ).

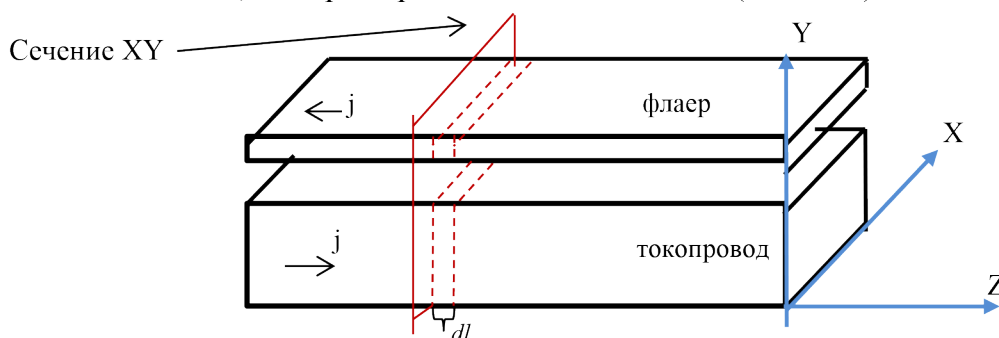


Рисунок 6 – Взаимное расположение флаера и обратного токопровода

1. Общая толщина  $L = const$ ,  $dl$  – переменная, где  $dl$  – толщина ячейки вдоль оси  $Z$  и  $L = \sum dl$ .

На рисунках 7, 8 представлено распределение модуля напряженности магнитного поля в центральном сечении  $XY$ . Кратное трем изменение количества ячеек не меняет картину распределения поля вокруг флаера.

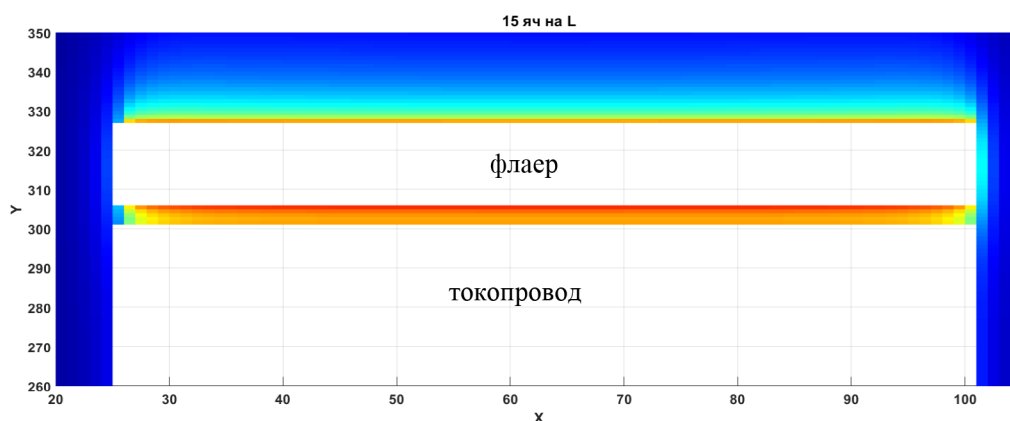


Рисунок 7 – Распределение модуля напряженности магнитного поля в центральном сечении  $XY$ . 15 ячеек  $dl$  при  $L = 0,5$  мм

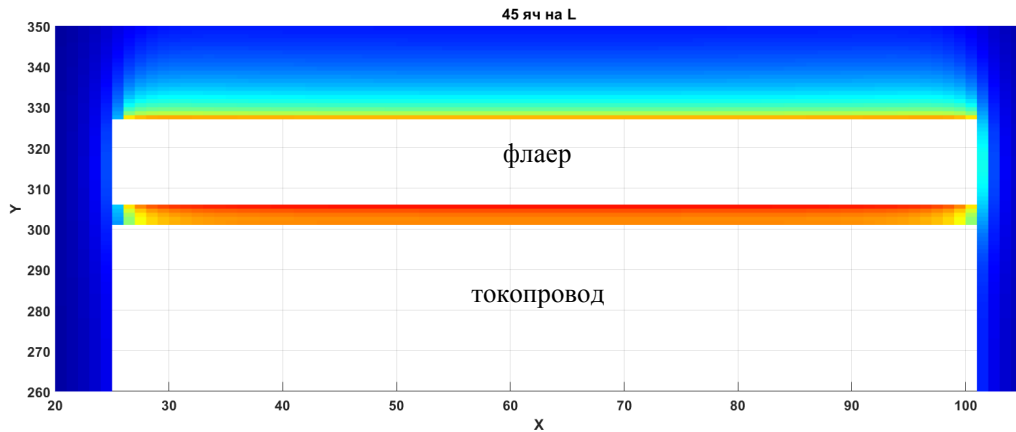


Рисунок 8 – Распределение модуля напряженности магнитного поля в центральном сечении  $XY$ . 45 ячеек  $dl$  при  $L = 0,5$  мм

2. Общая толщина  $L$  – переменная,  $dl = const$ .

Далее будет продемонстрировано, как изменяется распределение модуля напряженности магнитного поля при увеличении количества слоев.

На рисунках 9–11 приведены профили модуля напряженности магнитного поля при увеличении слоев (толщина  $dl = 0.5$  мм). Как видно из рисунков 9–11, в зазоре «флаер–ОТ» профиль  $H$  скругляется, а за внешней стороной флаера выгибается в обратную сторону.

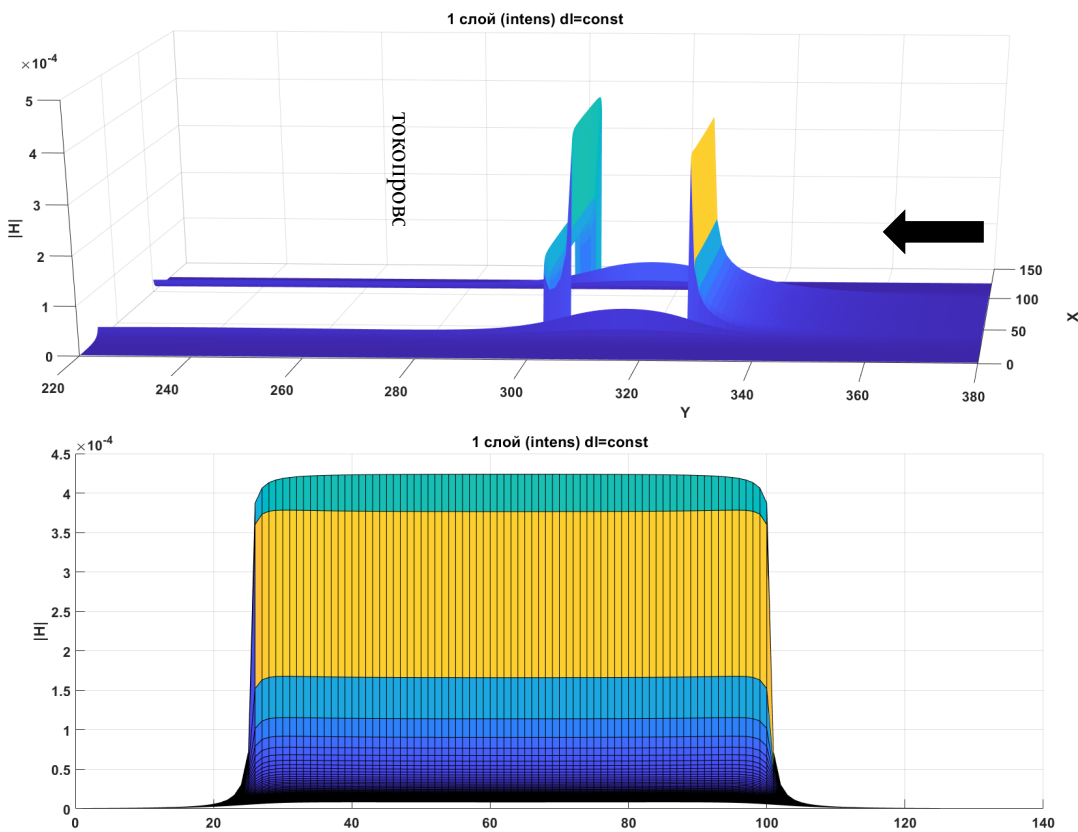


Рисунок 9 – Распределение модуля напряженности магнитного поля. 1 слой  $dl$ .



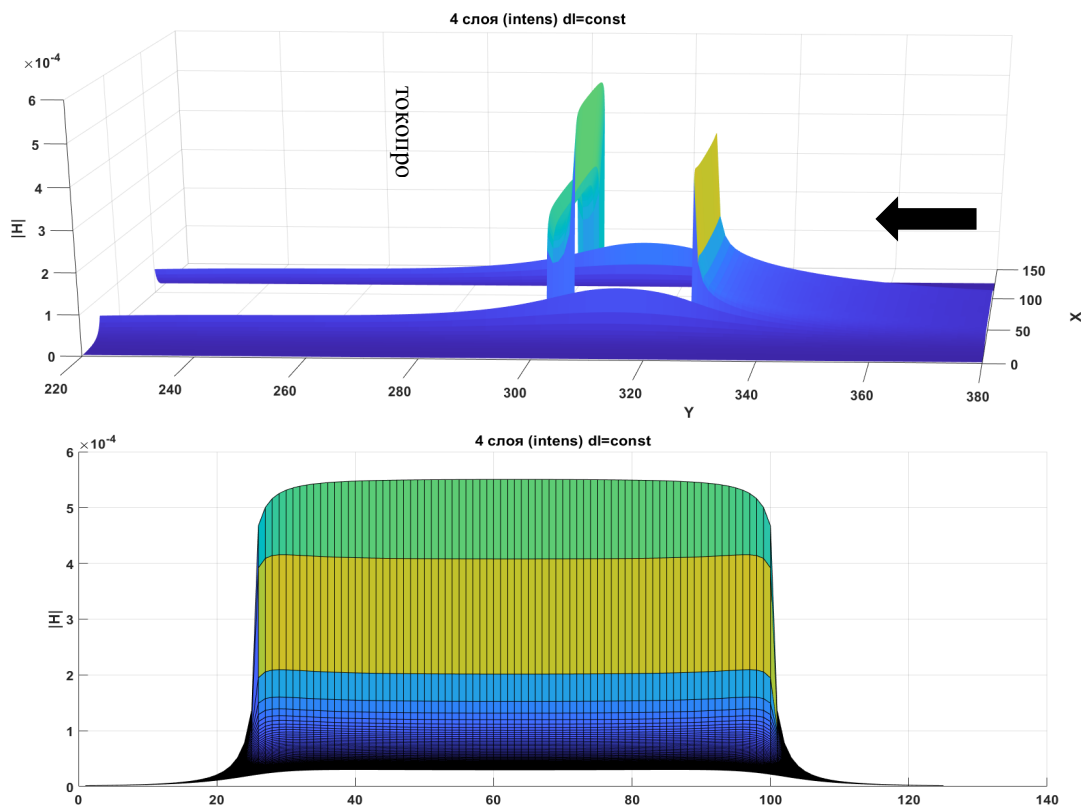


Рисунок 10 – Распределение модуля напряженности магнитного поля. 4 слоя  $dl$ .

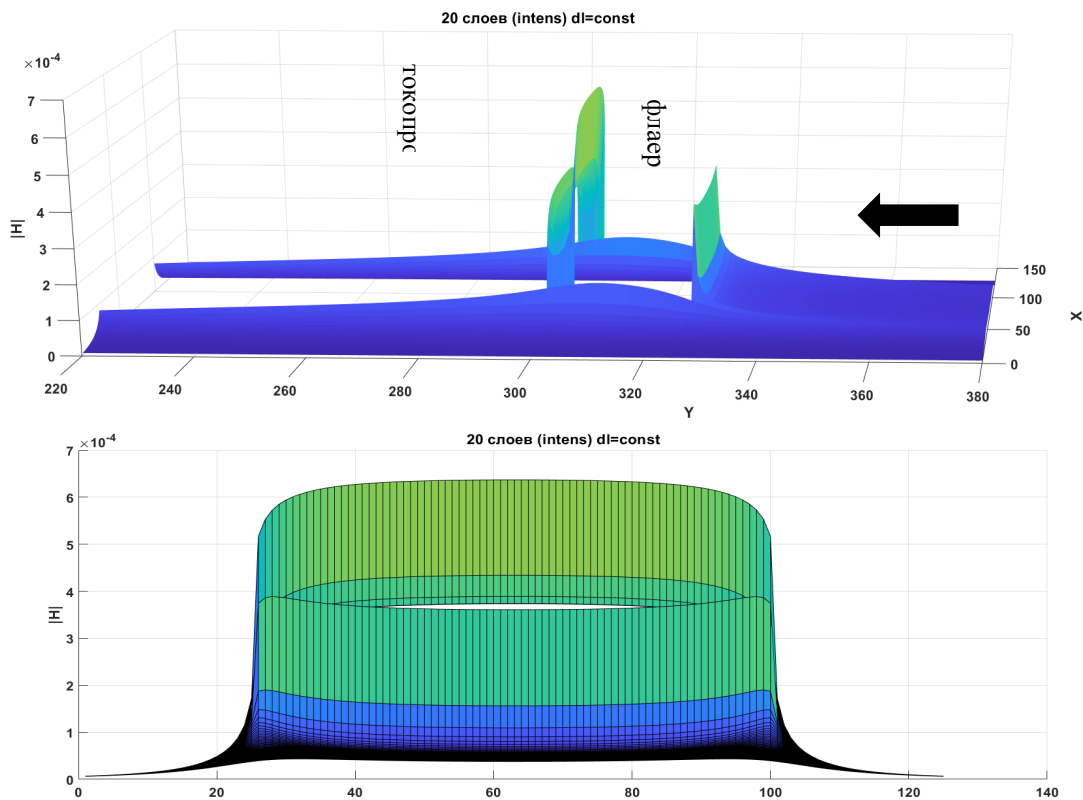


Рисунок 11 – Распределение модуля напряженности магнитного поля. 5 слоев  $dl$ .

Возможность численно производить расчет по толщине позволяет перейти к определению сил на единицу площади, действующих на флаер со стороны обратного токопровода, и оптимизировать размеры флаера для максимизации этой силы.

### **Заключение**

Для различных геометрических конфигураций «флаер – обратный токопровод» по закону Био-Савара-Лапласа рассчитаны распределения магнитного поля.

Полученные результаты (по известному полю) позволяют более точно оценить распределение тока в системе.

Для двумерной задачи из полученных результатов следует:

1. Изменение (смещение к поверхности – границе зазора) плотности тока  $j$ , протекающего в обратном токопроводе, приводит к увеличению продольного поля вдоль оси  $X$  ( $H_x$  в зазоре).
2. С уменьшением ширины обратного токопровода (вплоть до размеров флаера) распределение магнитного поля в зазоре и тока во флаере становятся более однородным.
3. Обратный токопровод необходимо изготавливать из меди (в настоящее время изготавливается из стали). При использовании стали необходимо использовать немагнитную сталь (магнитная проницаемость  $\mu_{Fe} > \mu_{Cu}$ , удельное сопротивление  $\rho_{Fe} > \rho_{Cu}$ ).

Для трехмерной задачи из полученных результатов следует, что расчетные ячейки, удаленные от сечения, в котором выполняются расчеты распределения магнитного поля, оказывают существенное влияние на распределение поля в зазоре и за флаером.

#### *Использованные источники:*

1. Григорьев А.Н., Борщевский М.А., Матвеев И.В., Лубенченко Н.А., Электротехнический расчет токораспределения при электрическом взрыве фольги / Труды Харитоновские научные чтения-2023.
2. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Лубенченко Н.А., Инженерная модель для оценки скорости флаера в сильноточных установках / Труды Забабахинские научные чтения-2023.
3. Прокофьев Д.Д., Распределение магнитного поля, созданного током, протекающим по пластине, находящейся в сверхпроводящем состоянии // ЖТФ, т. 76, вып. 6, 2006
4. Джексон Дж., Классическая электродинамика. Москва: Мир, 1965
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учебное пособие: Для вузов. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – 4-е издание. – Москва: Физматлит, 2005.

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИММОБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ПЕРЛИТНЫХ ПУЛЬП В НЕВОЗВРАТНЫЙ КОНТЕЙНЕР НЗК-150-1,5П**

Монстаков Д.А., Старовойтов Н.П., Дудкин В.А., Козлов П.В.  
ФГУП «Производственное объединение «Маяк», Озерск, Челябинская обл.  
[cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

Рассмотрены варианты иммобилизации ВАО перлитных пульп, накопленных при переработке патронных фильтров, в невозвратном контейнере типа НЗК-150-1,5П с вариантами цементирования и остекловывания, в невозвратном контейнере. Построена конечно-элементная математическая 3D модель с целью решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов. Исследовано влияние вещества, используемого в качестве буферного свободного объема на объемную плотность тепловыделения остеклованных ВАО. Получена зависимость выхода отходов на стационарное состояние. Установлено время достижения стационарного состояния для различных видов материалов и веществ, при которых температура максимальна для выбранного типа отверждения. По результатам конечно-элементного моделирования составлено температурное поле упаковки с перлитной пульпой для различных вариантов отверждения. Показано, что при 12% включении ВАО в цемент температура в центре компаунда составит 42 °С. Остеклованные ВАО при заполнении свободного объема воздухом достигнут 72 °С, а при использовании бентонита температура составит 52 °С.

## **EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF IMMOBILISATION OF HIGH-ACTIVITY PEARLITE SLURRIES INTO NON-RETURNABLE CONTAINER NZK-150-1.5P**

Monstakov D.A., Starovoitov N.P., Dudkin V.A., Kozlov P.V., Shaidullin S.M.  
FSUE PA Mayak, Ozersk, Chelyabinsk region  
[cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

The variants of immobilisation of perlite slurries accumulated during processing of cartridge filters in a non-returnable container of NZK-150-1.5P type with variants of cementation and vitrification in a non-returnable container are considered. A 3D finite element mathematical model has been built to solve the differential heat conduction equation by the finite element method. The influence of the substance used as a buffer free volume on the volume density of heat release of vitrified high active wastes is investigated. The dependence of the waste yield on the stationary state has been obtained. The time of reaching the stationary state for different types of materials and substances at which the temperature is maximum for the selected type of curing is established. According to the results of finite element modelling the temperature field of packing with perlite slurry for different variants of curing is made up. It is shown that at 12% incorporation of high active wastes into cement the temperature in the centre of the compound will be 42 °C. The vitrified high active wastes when filling the free volume with air will reach 72 °C, and when bentonite is used the temperature will be 52 °C.

При переработке топлива отработавших ТВС на этапе фильтрации возникает проблема долговременного хранения перлитных пульп, образующихся от использованных патронных и насыпных фильтров. Осадки от патронного фильтра относятся к категории высокоактивных отходов (ВАО).

В настоящее время предлагается несколько вариантов переработки перлитной пульпы:  
– цементирование на локальной установке с учетом требований ядерной безопасности;  
– остекловывание методом индукционной плавки в «горячем тигле».

Степень включения перлитной пульпы цементного компаунда с плотностью, равной 1,4 т/м<sup>3</sup>, составит 12 масс. %.

Для остекловывания перлитной пульпы предполагается использовать алюмофосфатное стекло, в котором степень включения сухого остатка перлитной пульпы составит 59 масс. %. Стекло включается в первичные упаковки.

Первичные упаковки со стеклом возможно разместить в транспортном контейнере типа НЗК-150-1,5П, при этом свободный объем контейнера предполагается заполнить бентонитом, либо воздухом.

Объемная плотность тепловыделения оценивалась с учетом радиоактивного распада альфа-, бета- и гамма-радионуклидов. Энергии радионуклидов принимались отдельно для каждого нуклида, соответствуя средней энергии от распада [1].

По результатам расчетов объемная плотность тепловыделения для цементного компаунда и алюмофосфатного стекла составит соответственно 18 Вт/м<sup>3</sup> и 88,5 Вт/м<sup>3</sup>.

Для определения времени нагрева остеклованного ВАО (цементной матрицы с ВАО) и стенок контейнера до критических температур в случае повышенной объемной плотности тепловыделения с учетом свободной конвекции проведен нестационарный теплофизический расчет с использованием метода конечных элементов. Конечно-элементная математическая (КЭМ) модель контейнера, включает в себя:

- геометрические размеры первичных контейнеров с остеклованными ВАО и НЗК-150-1,5П;
- объемное тепловыделение в компаунде;
- теплофизические параметры веществ;
- охлаждение контейнера за счет свободной конвекции от стенок к воздуху.

Проведено моделирование хранения остеклованных и цементируемых ВАО в НЗК-150-1,5П с учетом таких механизмов теплообмена, как:

- кондуктивная теплопроводность по конструктивным элементам НЗК-150-1,5П, а также воздушной прослойкой;
- теплообмен конвекцией и излучением между наружной поверхностью первичных контейнеров и воздушной средой.

Температура внешней среды принималась равной 38 °С [2], коэффициент теплоотдачи от бетона к воздушной среде равен 5 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [2].

По результатам оценочного теплового расчета следует, что при хранении остеклованных ВАО с объемной плотностью тепловыделения 88,5 Вт/м<sup>3</sup> температура первичных контейнеров не превысит 52 °С и 72 °С для буферного материала бентонит и воздух соответственно при любых вариантах комплектации НЗК-150-1,5П. В случае цементного компаунда стационарное состояние системы компаунд-контейнер стабилизируется на 42 °С.

*Использованные источники:*

1. International Atomic Energy Agency – Nuclear Data Section, 2023. Секция ядерных данных МАГАТЭ: база данных NuDat 3.0. URL: <https://www.nnds.cnl.gov/nudat3/> (дата обращения 04.09.2023).
2. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности / Р. М. Гатауллин, Н. Н. Дивиденко, Н. В. Свиридов. – Москва: Логос, 2012 – 255 с.

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ И СЛИВА БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ИЗ УДАЛЯЕМОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ДИЗАЙНА ФГУП «ПО «МАЯК»

Понькин Е.И., Шайдуллин С.М., Дудкин В.А.  
ФГУП «Производственное объединение «Маяк», г. Озерск Челябинской области  
[e-mail: cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

Аннотация. Проведено моделирование процесса слива расплава боросиликатного стекла в индукционно обогреваемом сливном устройстве удаляемого малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк». Был выполнен тепловой расчет малогабаритной печи остекловывания ВАО с боросиликатным стеклом при его плавке и сливе.

*Ключевые слова:* боросиликатное стекло, тепловой расчет, малогабаритный плавитель.

## THERMAL CALCULATION OF THE PROCESS OF MELTING AND DRAINING BOROSILICATE GLASS FROM A REMOVABLE SMALL-SIZED MELTER DESIGNED BY MAYAK PA

E.I. Ponkin, S.M. Shaydullin, V.A. Dudkin  
FSUE Mayak Production Association, Ozyorsk, Chelyabinsk Region  
[e-mail: cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

Abstract. Modeling of the process of draining molten borosilicate glass in an induction heating drain system of a removable small-sized melter designed by Mayak PA was carried out. A thermal calculation was performed for a small-sized HLW vitrification furnace with borosilicate glass during it is melting and draining.

*Keywords:* borosilicate glass, thermal calculation, small-sized melter.

Испытания удаляемого малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» выявили недостатки в части инициации процесса слива расплава стекла и его останковки [1]. Цель работы моделирование технологической операции разогрев/слив расплава боросиликатного стекла в индукционно обогреваемом сливном устройстве опытного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк».

Тепловой расчет разогрева малогабаритной печи остекловывания ВАО в течение технологической операции разогрев/слив 08.06.2020 был выполнен методом конечных элементов с использованием программного комплекса Comsol Multiphysics [2] с учетом следующих допущений:

– При моделировании функция энерговыделения (далее ЭВ) задавалась как разница между мощностью энерговложения, обусловленной действием электрического тока в стекломассе, и количеством тепла, уносимого воздухом через систему охлаждения электродов,

– На внешних поверхностях малогабаритной печи остекловывания ВАО задавались граничные условия теплообмена с окружающим воздухом за счет механизма естественной конвекции и излучения. На границе симметрии задавались условия теплоизоляции,

– Функция объемного ЭВ задавалась постоянной, не зависящей от геометрических координат. Так как проводимость стекла с ростом температуры увеличивается, это означает, что максимум ЭВ соответствует области с минимальной температурой, поэтому в месте контакта стекла с материалом кладки печи расчетная температура кладки при данном допущении всегда ниже экспериментального значения.

На рисунке 1 приведены результаты расчета вкладываемой электрической мощности ЭВ и суммарной мощности теплопотерь, снимаемых системой охлаждения печи, в течение технологической операции разогрев/слив 08.06.2020.

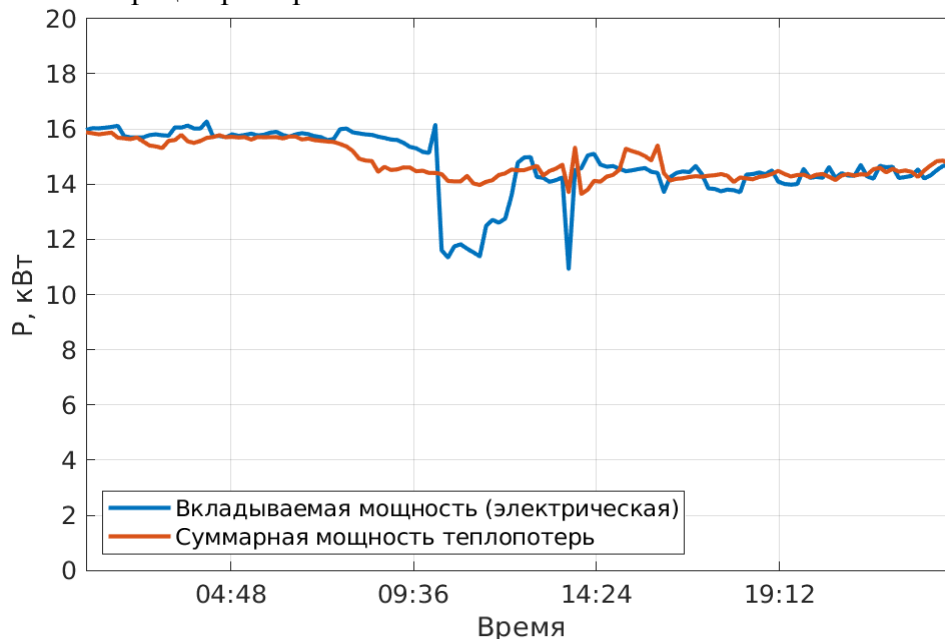


Рисунок 1 – Значение вкладываемой мощности ЭВ и мощности теплопотерь в течение технологической операции разогрев/слив 08.06.2020

Результаты расчета температуры элементов печи и расплава стекла (термограммы и графики) печи в целом и в местах установки термопар и сравнение с данными МАИС представлены на рисунках 2 - 9.

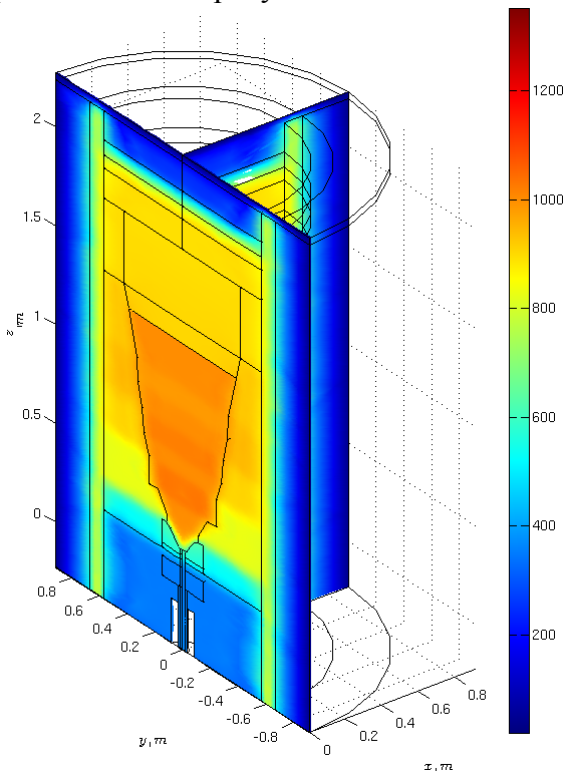


Рисунок 2 – Распределение температуры в объеме печи остекловывания ВАО в начале разогрева

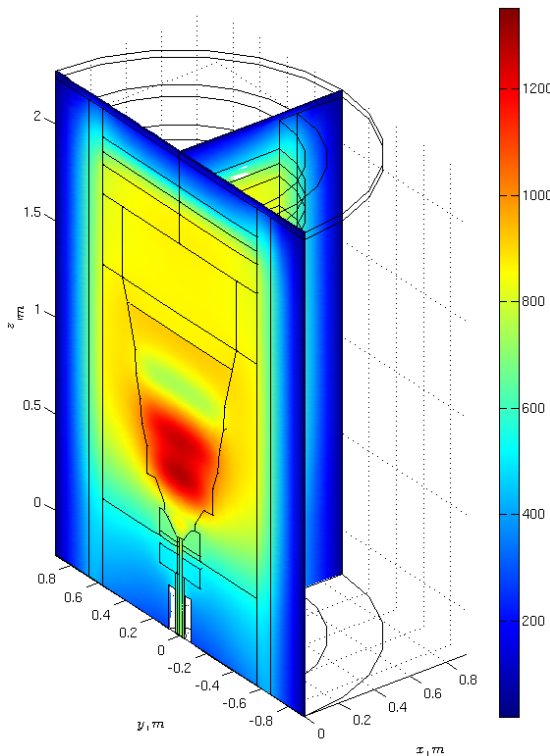


Рисунок 3 – Распределение температуры в объеме печи остекловывания ВАО в начале слива расплава стекла

На приведенных рисунках видно, что максимальная разница в абсолютных значениях температуры элементов печи в местах установки термопар не превышает 100 °С, что



составляет около 10 % от действующих значений температуры. Для допущений, заложенных в модель, данный результат можно считать удовлетворительным.

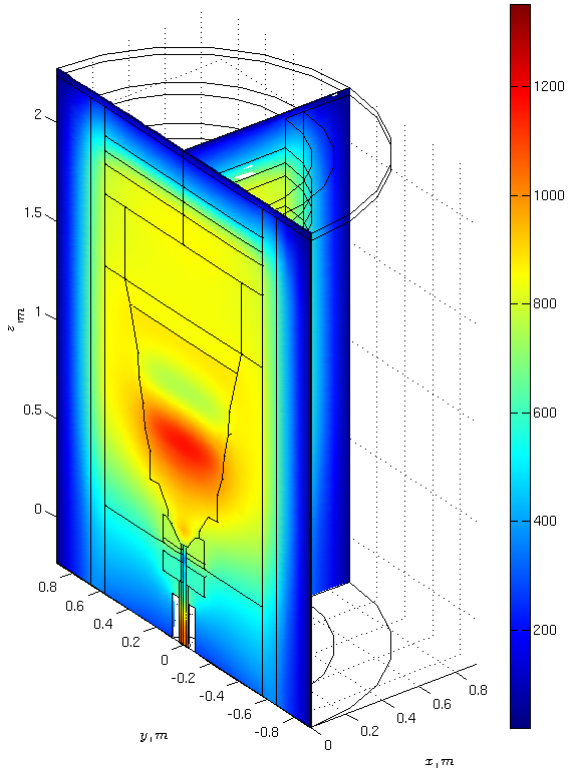


Рисунок 4 – Распределение температуры в объеме печи остекловывания ВАО в конце слива расплава стекла

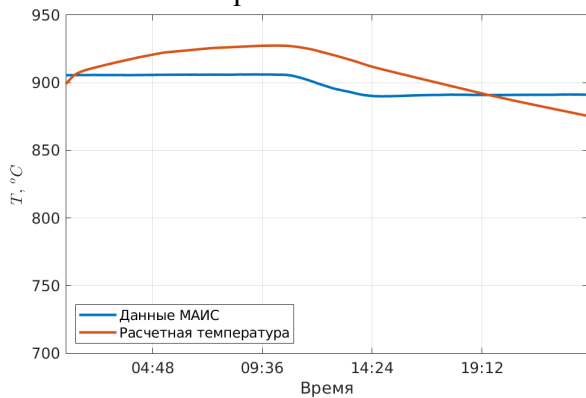


Рисунок 6 – Средняя расчетная и экспериментальная температура в «теле» блока (5 ряд, блок 1, 7)

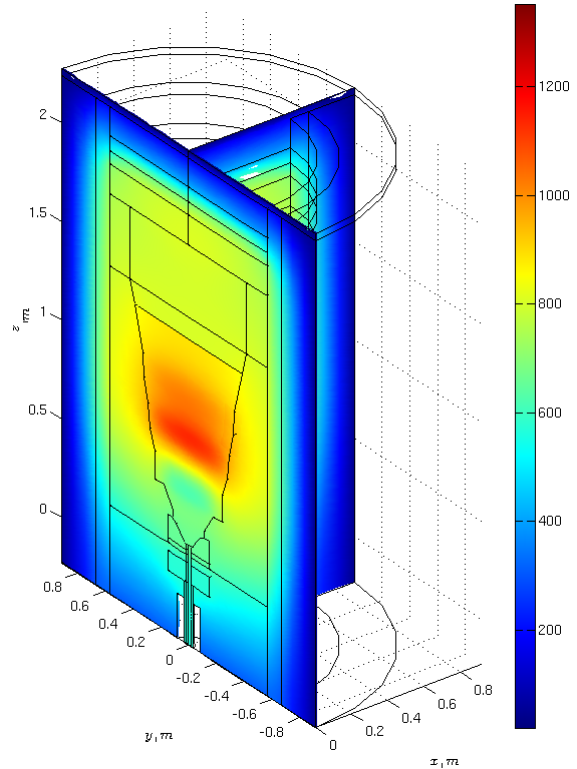


Рисунок 5 – Распределение температуры в объеме печи остекловывания ВАО в конце операции разогрев/слив

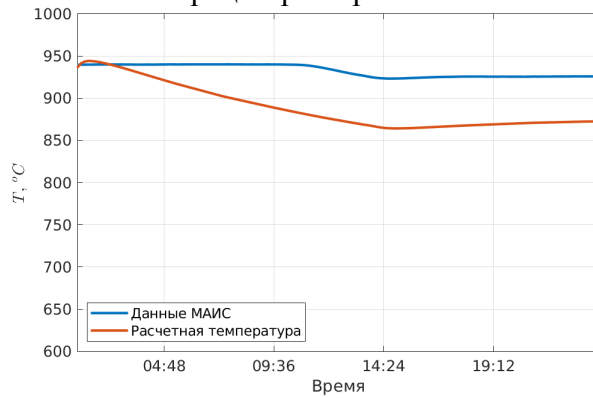


Рисунок 7 – Средняя расчетная и экспериментальная температура в «теле» блока (6 ряд, блок 1, 7)

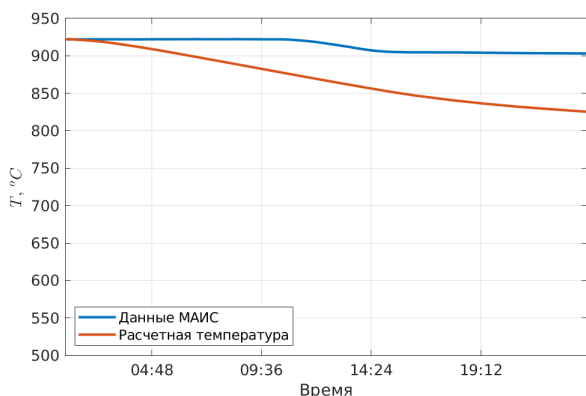


Рисунок 8 – Средняя расчетная и экспериментальная температура в «теле» блока (7 ряд, блок 1, 7)

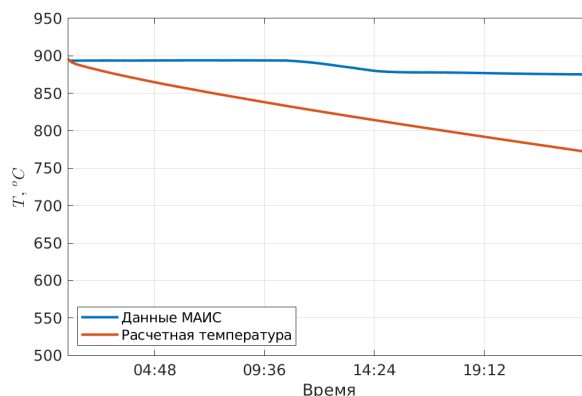


Рисунок 9 – Средняя расчетная и экспериментальная температура в «теле» блока (8 ряд, блок 1, 7)

Полученные результаты по распределению температуры в элементах печи и расплаве стекломассы удовлетворительно согласуются с данными МАИС и могут быть использованы для моделирования технологической операции слива расплава стекломассы из печи. Также построенная модель может быть использована для экспертной оценки результатов, получаемых на цифровом двойнике разработки СПБПУ.

*Использованные источники:*

1. Шайдуллин С.М., Ремизов М.Б., Козлов П.В., Мелентьев А.Б., Вербицкий К.В., Бендасов Д.И., Ребрин М.А. Новый эвакуируемый малогабаритный плавитель с донным сливом дизайна ФГУП «ПО «МАЯК» для отверждения ВАО в боросиликатное стекло. Вестник НИЯУ МИФИ. 2021;10(2):183-190. <https://doi.org/10.56304/S2304487X21020097>
2. Comsol Multiphysics 4.2. Лицензия № 17073360.

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОФИЗИКИ

Свердлов В. И., Григорьев А. Н.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[vlad.sverdlov.01@mail.ru](mailto:vlad.sverdlov.01@mail.ru)

Сформулирована и решена задача о переходном процессе в электрической цепи с массивным проводником и активным сопротивлением. Получены математические выражения для расчета тока в электрической цепи при постоянном напряжении в различных условиях: с активным сопротивлением и без него. С использованием этих выражений становится возможным определение зависимости тока от времени для произвольной формы напряжения. Кроме того, с использованием изображения тока, можно вывести выражения для распределения напряженности магнитного поля, плотности тока, механических нагрузок и выделения тепла в массивном проводнике.

*Ключевые слова:* бифиляр, массивный проводник, уравнения Максвелла, плотность тока, преобразование Лапласа, переходное сопротивление.

## APPLICATION OF OPERATOR CALCULUS IN PROBLEMS OF ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROPHYSICS

Sverdlov V. I., Grigoriev A. N.

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University  
MEPhI, Chelyabinsk Region*

*FSUE RFYATS-VNIITF named after Academician E.I. Zababakhina", Snezhinsk, Chelyabinsk  
region*

[vlad.sverdlov.01@mail.ru](mailto:vlad.sverdlov.01@mail.ru)

The problem of a transient process in an electrical circuit with a massive conductor and active resistance is formulated and solved. Mathematical expressions are obtained for calculating the current in an electrical circuit at constant voltage under various conditions: with and without active resistance. Using these expressions, it becomes possible to determine the dependence of current on time for an arbitrary voltage waveform. In addition, using the current image, expressions can be derived for the distribution of magnetic field strength, current density, mechanical loads and heat generation in a solid conductor.

*Key words:* bifilar, massive conductor, Maxwell's equations, current density, Laplace transform, transition resistance.

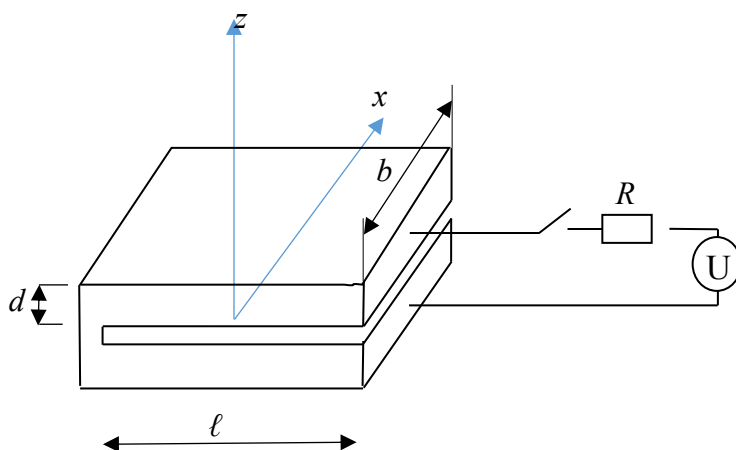


Рис.1. Принципиальная схема электрической цепи

Рассмотрим бифиляр (рис.1), то есть систему из двух массивных проводников, включённых последовательно и разделённых плоским изоляционным зазором длиной  $\ell$ , шириной  $b$  и толщиной  $h$ , которую будем считать исчезающе малой.

Если толщина проводника  $d$  много больше глубины проникновения, то можно считать  $d = \infty$ , то такой проводник (бифиляр) называется массивным. Пусть такой проводник подключён к активному сопротивлению  $R$  и источнику напряжения  $U(t)$  через ключ и в момент времени  $t=0$  ключ замыкается и возникает коммутация.

Полная система уравнений Максвелла и соответствующие граничные условия к ним для поля внутри проводника [1]:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}_{\text{пр}} \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \\ \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \\ \vec{\delta} = \gamma \vec{E} \end{cases} \quad (1)$$

Ввиду симметрии системы распределение тока в каждом из проводников одинаково и может быть найдено путём решения известного уравнения [1] для плотности тока  $\delta(z, t)$ , являющегося следствием уравнений Максвелла (1).

$$\frac{\partial^2 \delta(z, t)}{\partial z^2} - \mu_a \gamma \frac{\partial \delta(z, t)}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – проводимость материала;

$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$  – произведение магнитной восприимчивости вакуума ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ ), на магнитную проницаемость среды.

Со следующими начальными и граничными условиями:

$$\delta(\infty) = 0, \quad (3.1)$$

$$J = \frac{i(t)}{b} = \int_0^\infty \delta(x, t) dx, \quad (3.2)$$

$$\delta(z, 0) = 0, \quad (3.3)$$

где  $J$  – плотность тока вне проводника;

$|\vec{J}| = |\vec{H}_n|$  – связь между напряжённостью на границе проводника и поверхностной плотностью тока [2].

Будем считать, что материал бифиляра не является ферромагнитным. Вследствие чего магнитная проницаемость не будет зависеть от величины проникающего тока  $\mu \approx 1$ .

Применив преобразование Лапласа и используя граничные и начальные условия, получается следующее выражение для операционного изображения  $\tilde{\delta}(z, p)$

$$\tilde{\delta}(z, p) = \frac{\tilde{I}(p)}{b} \sqrt{\mu \cdot \gamma \cdot p} \exp(-z \sqrt{\mu_a \gamma p}) \quad (4)$$

Где  $\tilde{I}(p)$  – изображение тока в цепи.

Для изображения напряжённости электрического поля в точке  $z = 0$  имеем

$$\tilde{E}(0, p) = \frac{\tilde{\delta}(0, t)}{\gamma} = \frac{\tilde{I}(p)}{b} \sqrt{\mu_a \gamma p}. \quad (5)$$

Полное падение напряжения на проводниках определяется следующим образом

$$\tilde{U}(p) = \tilde{E}(0, p) \Delta x = \frac{\tilde{I}(p)}{b} \sqrt{\mu_a \gamma p} \cdot 2l. \quad (6)$$

Тогда переходное сопротивление запишется как

$$\tilde{Z}_n(p) = \frac{\tilde{U}(p)}{\tilde{I}(p)} = \frac{2l}{b} \sqrt{\frac{\mu_a p}{\gamma}}. \quad (7)$$

Полное сопротивление цепи складывается из переходного и активного сопротивления

$$\tilde{Z}(p) = R + \tilde{Z}_\pi(p) = R + \frac{2l}{b} \sqrt{\frac{\mu_a p}{\gamma}}. \quad (8)$$

Переходное сопротивление  $\tilde{Z}_\pi(p)$  характеризует потери в скин-слое и магнитный поток в нём.

По закону Ома изображение тока в цепи примет вид

$$\tilde{I}(p) = \frac{\tilde{U}_{\text{вх}}(p)}{\tilde{Z}(p)} = \frac{U_0}{p} \frac{1}{\left(R + \frac{2l}{b} \sqrt{\frac{\mu_a p}{\gamma}}\right)} = U_0 \frac{b}{2l} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_a}} \frac{1}{p \left(\frac{bR}{2l} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_a}} + \sqrt{p}\right)}, \quad (9)$$

где  $\tilde{U}_{\text{вх}}(p)$  – входное напряжение.

Оригинал функции по изображению  $\tilde{I}(p)$  тока в цепи имеет следующий вид [3]

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \left( 1 - e^{\frac{t}{t_R}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{t}{t_R}} \right) \right), \quad (10)$$

где  $t_R = \frac{4l^2}{b^2 R^2} \frac{\mu_a}{\gamma}$  – время нарастания тока с активным сопротивлением.

Рассмотрим случай размыкания идеального ключа в момент времени  $t = t_0$ . Тогда напряжение источника можно представить в виде разности функций Хевисайда

$$U_{\text{вх}}(t) = \eta(t) - \eta(t - t_0) \rightarrow U_{\text{вх}}(p) = U_0 \left( \frac{1}{p} - \frac{e^{-t_0 p}}{p} \right). \quad (11)$$

Подставляя (11) в (9) изображение тока будет описываться комплексной функцией

$$\tilde{I}(p) = U_0 \frac{b}{2l} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_a}} \frac{1 - e^{-t_0 p}}{p \left(\frac{bR}{2l} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_a}} + \sqrt{p}\right)}. \quad (12)$$

В этом случае ток в цепи будет изменяться по следующим законам (рис.3.)

$$i_R(t) = \begin{cases} \frac{U_0}{R} \left( 1 - e^{\frac{t}{t_R}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{t}{t_R}} \right) \right), & t < t_0 \\ \frac{U_0}{R} \left( e^{\frac{t-t_0}{t_R}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{t-t_0}{t_R}} \right) - e^{\frac{t}{t_R}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{t}{t_R}} \right) \right), & t \geq t_0 \end{cases} \quad (13)$$

В случае пренебрежительно малого активного сопротивления в цепи

$$\tilde{I}(p) = U_0 \frac{b}{2l} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_a}} \frac{1 - e^{-t_0 p}}{p \sqrt{p}} \rightarrow \frac{U_0}{\sqrt{\pi}} \left( \sqrt{\frac{t}{t_g}} - \sqrt{\frac{t-t_0}{t_g}} \right), \quad (14)$$

где  $t_g = \frac{4l^2}{b^2} \frac{\mu_a}{\gamma}$  – время нарастания тока без активного сопротивления,

откуда получаем выражение для тока

$$i_g(t) = \begin{cases} \frac{U_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{t_g}}, & t < t_0 \\ \frac{U_0}{\sqrt{\pi}} \left( \sqrt{\frac{t}{t_g}} - \sqrt{\frac{t-t_0}{t_g}} \right), & t \geq t_0 \end{cases} \quad (15)$$

Законы изменения напряжения источника и тока в цепи со временем представлены на рисунках 2, 3.

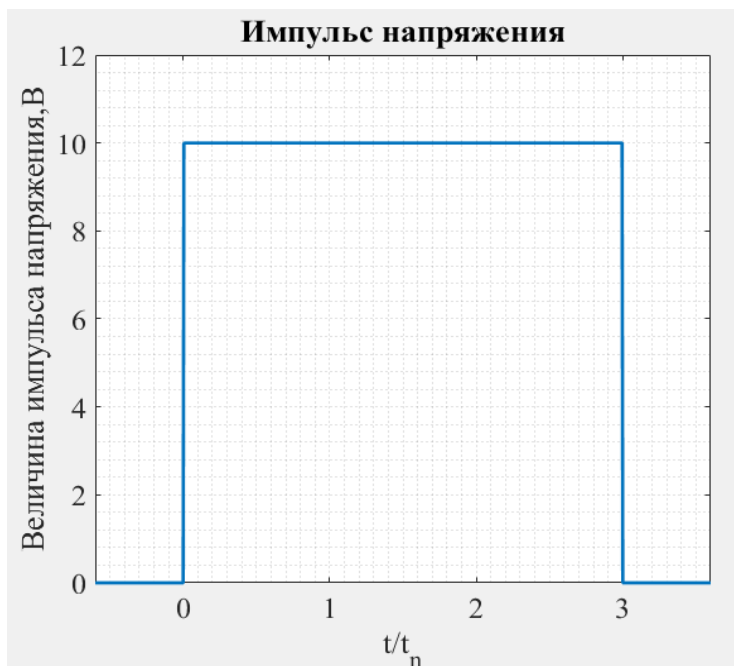


Рис.2. Изменение напряжения источника со временем

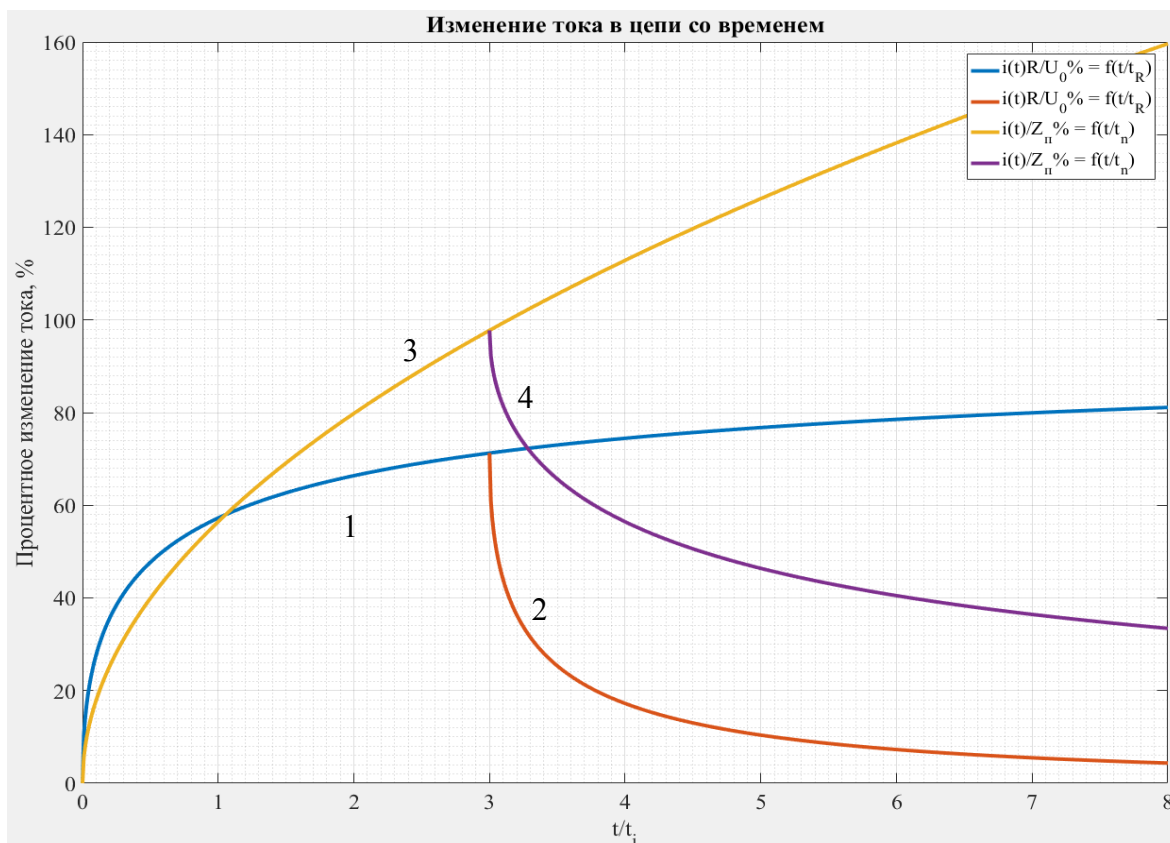


Рис.3. Изменение тока в электрической цепи со временем при постоянном напряжении в случаях:

- 1 – с активным сопротивлением без размыкания ключа (10);
- 2 – с активным сопротивлением и размыканием ключа (13);
- 3 – при отсутствии активного сопротивления без размыкания ключа (15);
- 4 – без активного сопротивления с размыканием ключа (15).



Использованные источники:

1. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление - Москва: GIFML, 1961. - 524 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — Москва: Наука, 1982. — 624 с. — («Теоретическая физика», том VIII).
3. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов / Г. А. Шнеерсон. - Ленинград: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1981. - 199 с. : ил.; 21 см.

## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Середкин Н.Н.<sup>1</sup>, Хищенко К.В.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», Долгопрудный,  
Московская обл.

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск  
[nikser12@yandex.ru](mailto:nikser12@yandex.ru)

Аннотация. Предложены уравнения состояния для компонентов конструкционных сплавов ядерных энергетических установок и модель термодинамики этих сплавов. Результаты расчетов ударных адиабат рассматриваемых материалов согласуются с данными ударно-волновых экспериментов.

*Ключевые слова: уравнения состояния, конструкционные сплавы, ударное сжатие, высокие давления, высокие температуры*

## EQUATIONS OF STATE FOR STRUCTURAL ALLOYS OF NUCLEAR POWER PLANTS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

Seredkin N.N.<sup>1</sup>, Khishchenko K.V.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

<sup>3</sup>South Ural State University, Chelyabinsk  
[nikser12@yandex.ru](mailto:nikser12@yandex.ru)

Abstract. Equations of state for components of structural alloys for nuclear power plants and a model of the thermodynamics of these alloys are proposed. The results of calculations of shock adiabats of materials under consideration are consistent with the data from shock-wave experiments.

*Key words: equations of state, structural alloys, shock compression, high pressures, high temperatures*

В активной зоне ядерного реактора материалы, из которых изготовлены элементы конструкций, находятся при высоких температурах, испытывают большие напряжения, могут подвергаться химическим реакциям и интенсивным потокам радиации [1—3]. Различные металлы (часто тугоплавкие) и их сплавы соответствуют таким условиям и применяются в ядерных энергетических установках. Среди них выделяются сплавы циркония [4], титана [5], ванадия [6], а также никеля [7]. Для моделирования разных режимов эксплуатации конструкционных сплавов необходимо обладать знанием термодинамических свойств этих материалов.

В настоящей работе представлена модель термодинамики сплавов. Уравнения состояния компонентов сплава, необходимые для использования в этой модели, задаются в виде двух сумм:

$$E(V, T) = E_c(V) + E_a(V, T) + E_e(V, T), \quad (1)$$

$$P(V, T) = P_c(V) + P_a(V, T) + P_e(V, T), \quad (2)$$

где  $E_c$  и  $P_c$  — составляющие внутренней энергии и давления при  $T = 0$ ;  $E_a$  и  $P_a$  — тепловой вклад тяжелых частиц (атомов, ионов);  $E_e$  и  $P_e$  — тепловой вклад электронов;  $V$  —

удельный объем;  $T$  — температура. При известных уравнениях состояния всех компонентов в виде (1) и (2) уравнение состояния сплавов определяется следующим образом:

$$V_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P, T), \quad E_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(P, T). \quad (3)$$

где  $V_{1N}$  и  $V_i$  — удельные объемы смеси и  $i$ -того компонента;  $E_{1N}$  и  $E_i$  — удельные внутренние энергии смеси и  $i$ -того компонента;  $\alpha_i$  — массовая доля  $i$ -того компонента;  $N$  — количество компонентов;  $P$  — давление.

На основе уравнений состояния для компонентов и смесей в форме (1)—(3) проведены расчеты ударных адиабат для некоторых конструкционных сплавов, результаты расчетов согласуются с известными данными ударно-волновых экспериментов в широком диапазоне давлений и температур.

Представленные уравнения состояния металлов и сплавов могут быть использованы при построении численных моделей процессов при высоких давлениях и температурах в ядерных энергетических установках.

*Использованные источники:*

1. Zinkle S.J., Busby J.T. Structural materials for fission & fusion energy // Mater. Today. — 2009. — V. 12, № 11. — P. 12—19.
2. Zinkle S.J., Was G.S. Materials challenges in nuclear energy // Acta Mater. — 2013. — V. 61, № 3. — P. 735—758.
3. Tong C. Role of materials to advanced nuclear energy // Introduction to Materials for Advanced Energy Systems. — Cham: Springer, 2019. — P. 655—717.
4. Ledon D., Uvarov S., Bannikova I., Bayandin Yu., Naimark O. Behavior of Zr-1Nb alloy in coarse- and ultrafine-grain states under laser-induced shock wave loading // Frattura ed Integrità Strutturale. — 2023. — V. 17, № 66. — P. 164—177.
5. Oryshchenko A.S., Kudryavtsev A.S., Mikhailov V.I., Leonov V.P. Titanium alloys for shipbuilding and nuclear power engineering // Inorganic Materials: Applied Research. — 2012. — V. 3, № 6. — P. 497—506.
6. Muroga T., Chen J.M., Chernov V.M., Kurtz R.J., Le Flem M. Present status of vanadium alloys for fusion applications // J. Nucl. Mater. — 2014. — V. 455, № 1—3. — P. 263—268.
7. Griffiths M. Ni-based alloys for reactor internals and steam generator applications // Structural Alloys for Nuclear Energy Applications. — Boston: Elsevier, 2019. — P. 349—409.

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРОХОЖДЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ В СЛУЧАЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

Скрябин С.Н., Садыков Н.Р.

*ФГБОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.  
[stepan.skryabin.04@mail.ru](mailto:stepan.skryabin.04@mail.ru)*

Базируясь на численном методе поиска собственных значений и собственных функций стационарных состояний реализована программа для расчета коэффициента прохождения в потенциальном поле произвольного профиля. Программа протестирована на известных аналитических решениях. В качестве прикладной задачи рассмотрена задача определения коэффициента прохождения в случае полевой эмиссии с острия нанотрубки наносубмикрометровой длины (в этом случае реализуется баллистический транспорт для носителей заряда), когда потенциальной энергии электронов в области, где находится нанотрубка, аппроксимировалась трапециевидной зависимостью. Также в области, где находится нанотрубка, была введена для потенциальной энергии периодическая зависимость от продольной координаты.

**Ключевые слова:** функции прохождения, материалы Шредингера, наноструктуры, баллистический транспорт, полевая эмиссия, метод обратных итераций, метод Виландта.

## THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE PASSING FUNCTION IN NANOSTRUCTURES IN THE CASE OF POTENTIAL ENERGY OF AN ARBITRARY PROFILE

Scriabin S.N., Sadykov N.R.

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University  
MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk Region*

Based on the numerical method of searching for eigenvalues and eigenfunctions of stationary states, a program has been implemented to calculate the transmission coefficient in a potential field of an arbitrary profile. The program has been tested on well-known analytical solutions. As an applied problem, we consider the problem of determining the transmission coefficient in the case of field emission from the tip of a nanotube of nano-submicrometer length (in this case, ballistic transport for charge carriers is realized), when the potential energy of electrons in the region where the nanotube is located is approximated by a trapezoidal dependence. Also, in the region where the nanotube is located, a periodic dependence on the longitudinal coordinate was introduced for the potential energy.

**Keywords:** transmission functions, Schrödinger materials, nanostructures, ballistic transport, field emission, Inverse iteration method, Wielandt method.

В последние десятилетия также интенсивно исследуются углеродные наноматериалы в качестве автоэммиттеров. Очень часто при исследовании процессов в наноструктурах рассматриваются материалов Шредингера.

В работе на основе метода поиска собственных значений и собственных функций стационарных состояний [1-5] для материалов Шредингера реализован алгоритм вычисления функции прохождения. Сам метода поиска собственных значений и собственных функций стационарных состояний представляет собой метод обратных итераций [1, 2].

Приведем результаты тестирования алгоритма. Сначала рассмотрим неглубокую потенциальную яму с прямоугольным профилем (см. иконку на рис. 1)

$$U = \begin{cases} U_1, & x < 0, \\ U_3, & 0 \leq x < L_1, \\ U_2, & 0 \leq x \leq L_1, \end{cases} \quad (1)$$

Где  $U_1 = \text{const}$ ,  $U_2 = \text{const}$ ,  $U_3 = 0$ . Аналитическое решение из [6] запишется

$$\tau = (2k_1k_3)^2 / \left[ (k_2 + k_1)^2 k_3^2 (\cos k_3 L)^2 + (k_2 k_1 + k_3^2)^2 (\sin k_3 L)^2 \right], \quad (2)$$

Где  $k_1 = \sqrt{2m_e(E - U_1)}/\hbar$ ,  $k_2 = \sqrt{2m_e(E - U_2)}/\hbar$ ,  $y_1(x) = e^{ik_3x}$ ,  $y_2(x) = e^{-ik_3x}$ ,  $k_3 = \sqrt{2m_e E}/\hbar$ . На рис. 1 штриховые кривые 1b, 2b и 3b являются коэффициентами прохождения, которые получены на основе реализованного алгоритма. На рис. 1 сплошные кривые 2a и 3a являются аналитическими решениями (2) при  $U_2 = U_{2a} = 3.75\text{eV}$  и  $U_2 = U_{2b} = 3.5\text{eV}$ , соответственно. На иконке рис. 1 изображена зависимость потенциальных энергий при  $U_2$ , равных  $U_1$ ,  $U_{2a}$ ,  $U_{2b}$ , соответственно. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента прохождения от энергии  $E \geq 0$  для потенциальной ямы

$$U(x) = -U_0 / [\cosh^2(\alpha x)], \quad (3)$$

где аналитическое решение для функции прохождения

$$\tau = \sinh^2\left(\frac{\pi k_4}{\alpha}\right) / \left[ \sinh^2\left(\frac{\pi k_4}{\alpha}\right) + \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{1 + \frac{8m_e U_0}{\hbar^2 \alpha^2}}\right) \right], \quad (4)$$

Где  $k_4 = \sqrt{2m_e E}/(2\hbar)$ ,  $U_0 = 4\text{ eV}$ ,  $\alpha = 0.25\text{ nm}^{-1}$ . На рис. 3 приведена зависимость коэффициента прохождения от энергии  $E$  для потенциальной ямы

$$U(x) = \begin{cases} U_1, & x < 0, \\ U_3, & 0 \leq x < L_1, \\ U_4, & L_1 \leq x < L_2, \\ U_2, & x \geq L_2. \end{cases} \quad (5)$$

Где  $L_1 = 14\text{ nm}$ ,  $L_2 = 14,25\text{ nm}$ ;  $U_1 = 4\text{eV}$ ,  $U_3 = 0$ ,  $U_4 = 4.65\text{ eV}$ ; потенциал  $U_2$  равняется  $U_1$ ,  $U_{2a}$  или  $U_{2b}$ , где  $U_{2a} = 3.75\text{eV}$ ,  $U_{2b} = 3.5\text{eV}$ . На рис. 3 кривым 1 (маркер “круг”), 2 (маркер “треугольник”), и 3 (маркер “ромб”), соответствуют потенциалы  $U_2 = U_1 = 4\text{eV}$ ,  $U_2 = U_{2a} = 3.75\text{eV}$  и  $U_2 = U_{2b} = 3.5\text{eV}$ . Кривая 4 на рис.3 соответствует сплошной аналитической кривой 1a из рис. 1. На рис. 4 приведена зависимость коэффициента прохождения от энергии  $E$  для периодической потенциальной ямы

$$U(x) = \begin{cases} U_5, & x < -L_3, -L_4 \leq x \leq L_4, x > L_3 \\ U_6, & -L_3 \leq x < -L_4, L_4 < x \leq L_3 \end{cases}, \quad (6)$$

где  $U_5 = 0$ ,  $U_6 = -1\text{eV}$ ,  $L_3 = 3.8\text{ nm}$ ,  $L_4 = 0.3\text{ nm}$

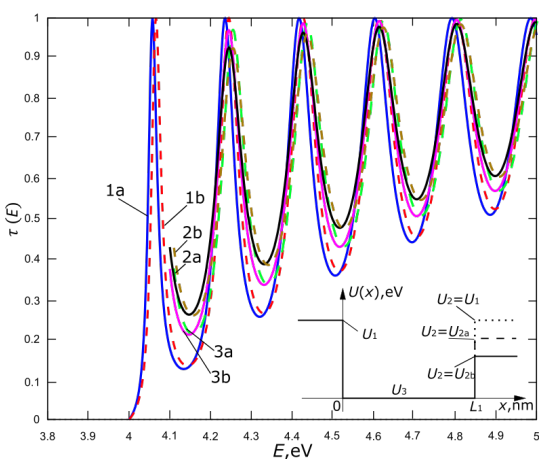


Рис.1.

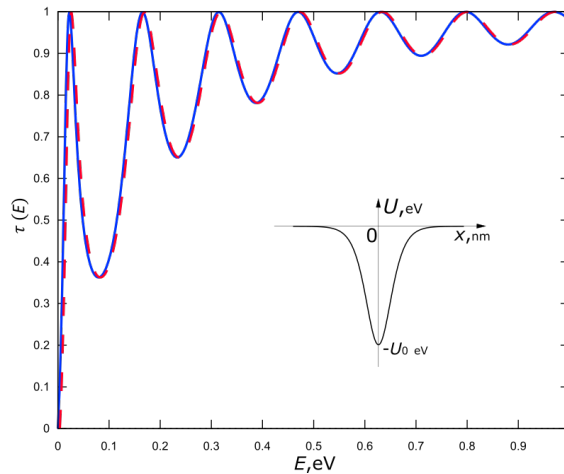


Рис.2.

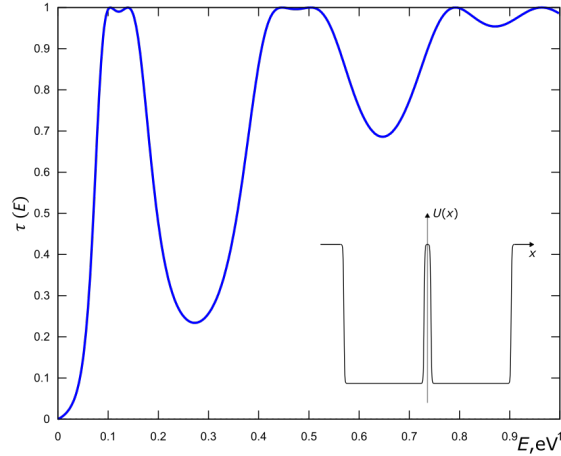
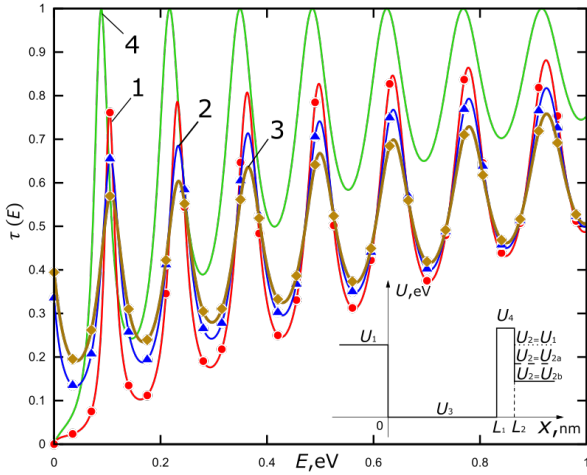


Рис.3.

Рис.4.

Реализованный алгоритм определения функции прохождения позволяют вычислить функцию прохождения в случае полевой эмиссии с острия удлиненной нанотрубки исходя из формулы Ландауэра [7] для случая баллистического транспорта электронов [8]. В работе [8, 9] функция прохождения была вычислена аналитически.

На рис. 5а приведена зависимость функции прохождения, которая была получена только численно, от энергии  $E$  во внешнем электрическом поле, где потенциальная энергия в области нанотрубки имела трапециевидальный профиль  $U_{ext} = -|e|Wz$ , а в области вакуума – треугольный профиль.

$$U(x) = \begin{cases} U_5, & x < 0, \\ U_6 = E_F - |e|Wz, & 0 \leq x < L_1, \\ U_7 = -|e|Wz, & L_1 \leq x \leq L_3, \\ U_8, & x \geq L_3, \end{cases} \quad (6)$$

Где  $U_5 = E_F$  – уровень Ферми металлического катода,  $U_6$  – уровень Ферми CNT, точка  $L_3$  находится на таком расстоянии от  $L_2$ , чтобы начиналось выполняться асимптотическое разложение функции Эйри (см. в [6] Fig. 2)

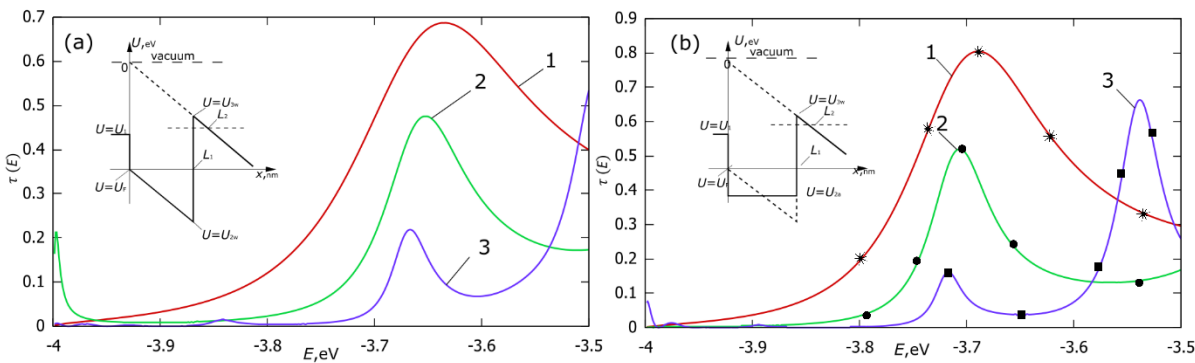


Рис.

5. Зависимость функции прохождения от энергии  $E$ . Кривые 1, 2 и 3 соответствуют длине нанотрубки  $L_1 = 3.5 \text{ nm}$ ,  $L_1 = 7 \text{ nm}$  и  $L_1 = 14 \text{ nm}$ , соответственно.

На рис. 5b показана расчетная зависимость функции пропускания от энергии  $E$  для случая [6], когда мы аппроксимируем потенциальную энергию в нанотрубке (штриховая линия на вставке, рис. 5b) мелкой прямоугольной потенциальной ямы (сплошной линией на вставке, рис. 5b). Из результатов расчетов, которые приведены на рис. 5b, следует полное совпадение с результатами работы [6] (см. Fig. 3b). На рис. 5b кривые 1, 2 и 3 представляют результаты наших расчетов, проведенные с помощью реализованной программы; маркеры «звездочка»,



«круг» и «квадрат» представляют собой результаты расчетов, полученные в [6]. Результаты, приведенные на рис. 5а незначительно отличаются по сравнению с приведенными результатами на рис. 5б. Существует также небольшое качественное отличие: сдвиг максимумов по горизонтали, в результате чего на рис. 5а в отличие от рис. 5б не видно вершины третьего максимума. Такое отличие объясняется тем, что на рис. 5а во внешнем электрическом поле используется потенциальная с треугольным профилем. Следует отметить, что отличие потенциалов в данной работе (см. иконки на рисунках 5а и 5б) приводит к тому, что функции прохождения  $\tau(E)$  смещаются друг относительно друга вдоль оси энергии  $E$ .

На рис.6 представлены функции прохождения для профилей потенциальной энергии, изображенной на иконке. На иконке штриховая кривая соответствует потенциалу, изображенному на иконке рис. 5а. Сплошная кривая на иконке из рис.6 содержит кроме потенциала во внешнем стационарном электрическом поле еще периодический потенциал. На рис. 6 сплошным красным кривым 1, сплошным зеленым кривым 2 и сплошным синим кривым 3 соответствуют потенциальные ямы шириной  $L_1 = 3.5 \text{ nm}$ ,  $L_1 = 7 \text{ nm}$  и  $L_1 = 14 \text{ nm}$ .

В работе реализован алгоритм расчета функции пропускания через одномерный потенциал с произвольным профилем потенциальной энергии исходя из алгоритма поиска собственных значений и собственных функций стационарных состояний материалов Шрёдингера (метод обратных итераций или модифицированный метод Виланда) [2, 10]). Реализованный алгоритм расчета функции пропускания можно свести к методу матрицы рассеяния [11]. В работе получено полное совпадение результатов расчета с аналитическим решением для малой прямоугольной потенциальной ямы и потенциальной ямы, определяемой гиперболическим секансом. Из результатов расчетов (рис. 5а) следует, что имеется хорошая количественная корреляция функций пропускания при автоэлектронной эмиссии, рассчитанных в [8 6] в двух приближениях (см. рис. 3 и 4). В работе также получена функция пропускания, когда трапециевидная зависимость потенциальной энергии в области, где находится нанотрубка, имела также периодическую зависимость. Такая качественная закономерность будет, если воспользоваться функционалом плотности Хартри-Фока [12].

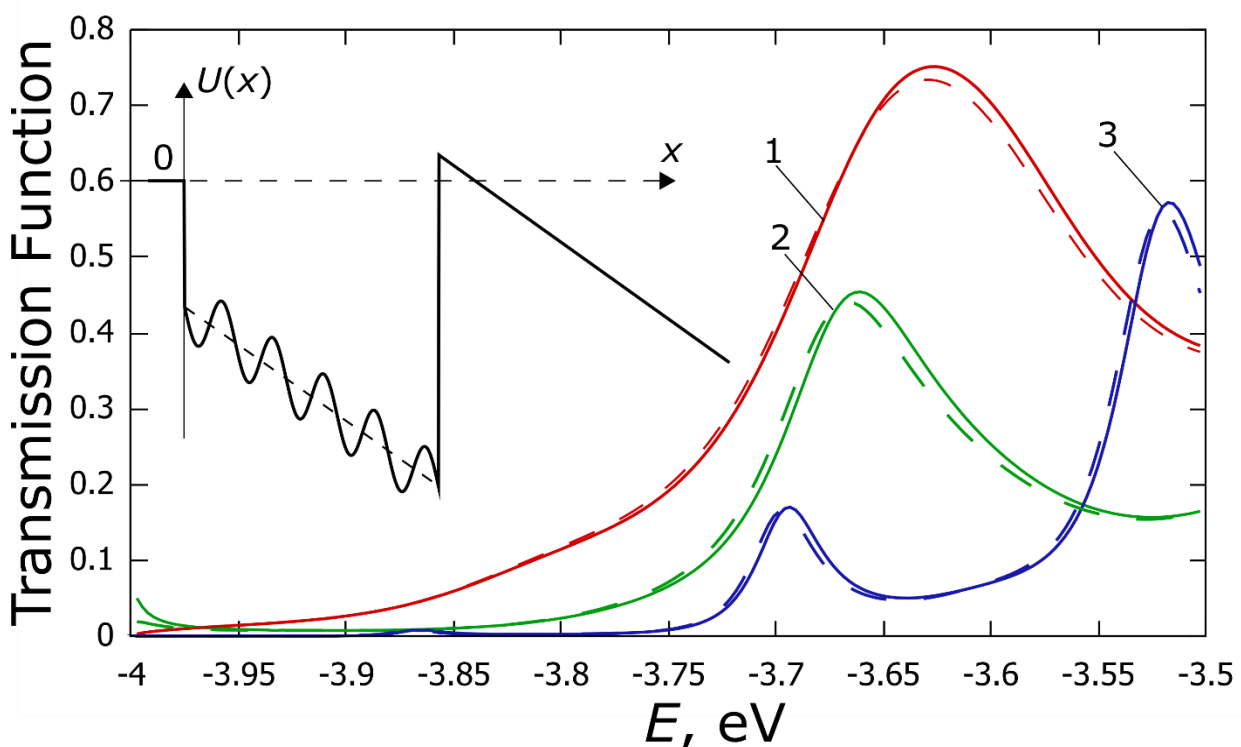


Рис.6. Зависимость функции прохождения от энергии. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют длине нанотрубки  $L_1 = 3.5 \text{ nm}$ ,  $L_1 = 7 \text{ nm}$  и  $L_1 = 14 \text{ nm}$ , соответственно.

*Использованные источники:*

- [1]. Икрамов Х.Д. Несимметричная проблема собственных значений: численные методы. М.: Наука, 1991, 240 с.
- [2]. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы: Перевод с английского – М.: Мир, 1983, 384 с.
- [3] Н.В. Юдина, Н.Р. Садыков. Журнал неорганической химии, 2019, т. 64, №1, с. 1-10.
- [4] Н.Р. Садыков, Н.В. Юдина. ЖТФ, 2020, том 90, вып. 3, стр. 387-395. DOI 10.21883/JTF.2020.03.48921.62-19
- [5] Н. В. Юдина, Н. Р. Садыков. ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА “МИФИ”, 2017, том 6, № 6, с. 519–527.
- [6] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика, Квантовая механика. Нерелятивистская теория (Наука, М., 2002), т. 3.
- [7] R. Landauer. Phil. Mag., 21, 863 (1972).
- [8] Sadykov, N.R., Khrabrov, R.S. & Pilipenko, I.A. Field emission in an array of homogeneous identical nanometer-long nanotubes. Eur. Phys. J. D 77, 9 (2023). <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-022-00582-5>
- [9] Н.Р. Садыков, С.Е. Жолниров, И.А. Пилипенко. ЖТФ, 2021, том 91, вып. 7.
- [10]. Wielandt H. Math. Z., 1944. V. 60. P. 93–143 <https://doi.org/10.1007/BF01312438>
- [11]. David Yuk Kei Ko and J. C. Inkson. Matrix method for tunneling in heterostructures: Resonant tunneling in multilayer systems, Phys. Rev. B, V. 38, pp. 9945- 9951 (1988). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.9945>
- [12] Axel D. Becke. THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS 140, 18A301-(1-17) (2014)

## ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВ МЕТОД КУРОПАТЕНКО РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМЫХ СРЕД

Стариков<sup>1</sup>Я.Е., Шестаковская<sup>1</sup>Е.С., Макеева<sup>1</sup>И.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск,  
Челябинская обл.

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[starikovie@susu.ru](mailto:starikovie@susu.ru)

В данной работе реализован численный метод расчета двумерных течений в эйлеровых координатах, в основу которого положена явная лагранжево-эйлерова разностная схема. Расчет каждого временного шага проводится в два этапа. На лагранжевом этапе применяется разностная схема, основанная на методе Куропатенко, который обладает нулевой диссипацией энергии на гладких решениях и минимальной дистракцией на сильных разрывах. На эйлеровом этапе применяется перестройка сетки и пересчет всех параметров вещества со старой сетки на новую в соответствии с законами сохранения массы, импульса и энергии. Разработанный численный алгоритм показал работоспособность при тестировании на задачах, имеющих аналитическое или эталонное решение.

*Ключевые слова:* лагранжево-эйлеровый метод, метод расчета ударных волн, метод Куропатенко.

## LAGRANGIAN-EULERIAN METHOD KUROPATENKO CALCULATION OF UNSTEADY FLOWS COMPRESSIBLE MEDIA

Ya.E. Starikov<sup>1</sup>, E.S. Shestakovskaya<sup>1</sup>, I.R. Makeeva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>FSAEIHU "South Ural State University (national research university)", Chelyabinsk, Chelyabinsk region

<sup>2</sup>FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Chelyabinsk region  
[starikovie@susu.ru](mailto:starikovie@susu.ru)

In this paper, a numerical method for calculating two-dimensional flows in Eulerian coordinates is implemented, which is based on an explicit Lagrangian-Eulerian difference scheme. The calculation of each time step is carried out in two stages. At the Lagrangian stage, a difference scheme based on the Kuropatenko method is used, which has zero energy dissipation on smooth solutions and minimal distraction on strong discontinuities. At the Eulerian stage, the mesh is rebuilt and all the parameters of the substance are recalculated from the old mesh to the new one in accordance with the laws of conservation of mass, momentum and energy. The developed numerical algorithm has shown its operability when tested on tasks having an analytical or reference solution.

*Keywords:* Lagrangian-Eulerian method, shock wave calculation method, Kuropatenko method.

Моделирование нестационарных течений жидкостей и газов в условиях динамических нагрузок, как правило, основывается на системе законов сохранения массы, количества движения и энергии, записанных в виде дифференциальных уравнений в форме Эйлера или Лагранжа. В случае высокоинтенсивных нагрузок в системе могут возникать ударные волны и волны разрежения, и решение системы дифференциальных уравнений в частных производных представляет собой разрывные (ударные волны) или недифференцируемые (волны разрежения) в отдельных точках функции. При построении численных методов используются различные механизмы диссипации энергии, позволяющие описывать, в том числе разрывные течения. Во всех случаях разрывы заменяются тонким переходным слоем с большими

производными газодинамических величин, что называется дистракцией сильных и слабых разрывов. Лагранжевы методы отличаются от Эйлеровых меньшей дистракцией и позволяют отслеживать контактные границы. Однако при переходе к моделированию дву- и трехмерных течений в Лагранжевых методах возникают проблемы, связанные с сильными деформациями сетки, что может увеличить общую погрешность численного решения. Поэтому представляется целесообразным объединить преимущества лагранжева и эйлерова подходов.

Идея лагранжево-эйлерового метода Куропатенко изложена в [1], где предложен подход к построению численного метода, в котором на первом этапе применяются уравнения в форме Лагранжа, а затем решение переинтерполируется на неподвижную Эйлерову сетку с выполнением всех законов сохранения. Для решения уравнений на лагранжевом этапе применяется дивергентный метод Куропатенко, который обладает рядом достоинств: отсутствие эмпирических констант, монотонность, минимальная дистракция разрывов, нулевая диссипация энтропии на непрерывных решениях и использование в качестве механизма диссипации энергии на ударных волнах законов сохранения на поверхности сильного разрыва. Одним из преимуществ предложенного подхода является использование ортогональных сеток на лагранжевом этапе, что существенно снижает вычислительную сложность и погрешности при вычислениях нормальных компонентов векторов скоростей, а также позволяет гораздо легче реализовать алгоритмы адаптации сетки. Отметим, что процесс переноса величин на ортогональную сетку на эйлеровом этапе является оригинальным вариантом расчета потоков термодинамических величин, которые непосредственно получаются исходя из деформации ячеек на лагранжевом этапе.

Данный метод был численно реализован и протестирован на ряде тестовых задач, предназначенных для оценки тех или иных аспектов работы численных методов. На рис.1 представлены результаты решения задачи Седова [2], на рис.2. – моделирование сверхзвукового течения в области со ступенькой [3].

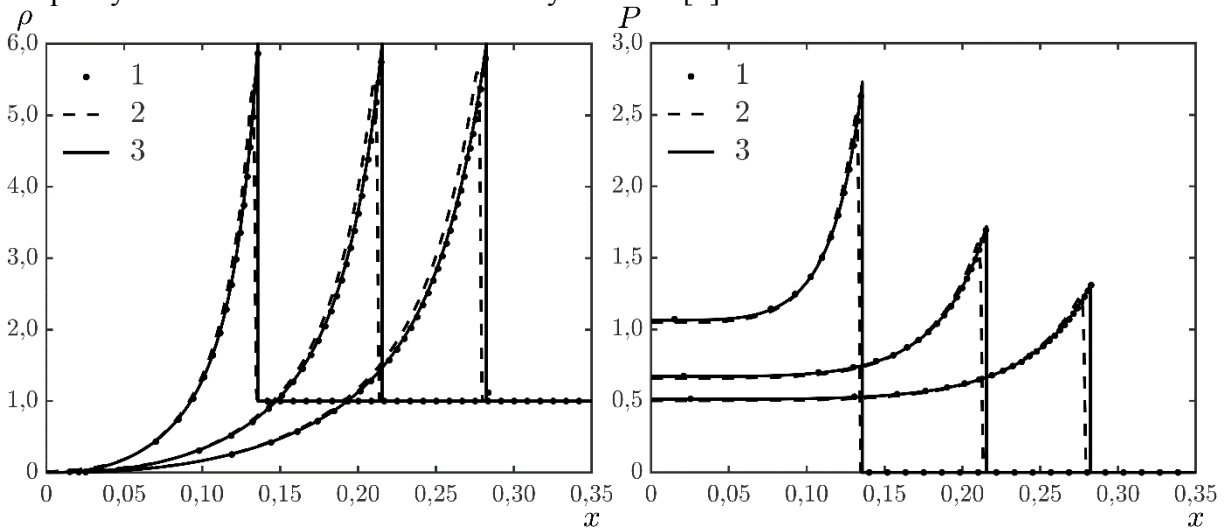


Рис. 1. Профили плотности и давления на три момента времени  $t = 0,05$ ,  $t = 0,10$ ,  $t = 0,15$ ; 1 – решение лагранжевым методом, 2 – решение лагранжево-эйлеровым методом, 3 – аналитическое решение [2].

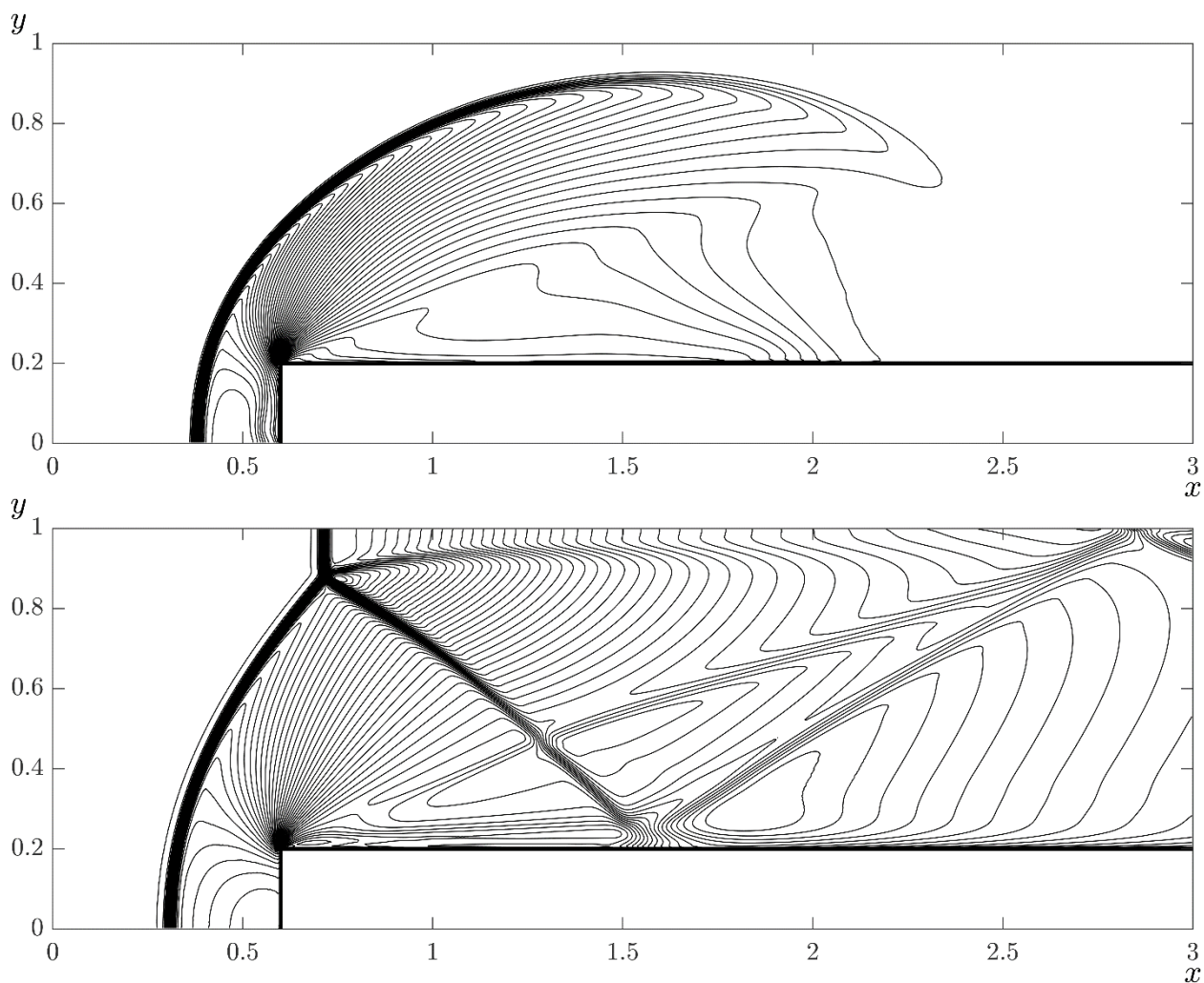


Рис. 2. Изолинии поля плотности на моменты времени  $t = 0,5$  и  $t = 3,0$ .

Численные расчеты задачи о Седовском взрыве имеют достаточную степень соответствия профилей термодинамических величин аналитическому решению. Моделирование задачи об обтекании ступеньки показало совпадение положений ударных волн, волн разрежения, ножек Маха с эталонным решением. Таким образом, описанный метод показал высокую точность моделирования течений со сложной структурой взаимодействующих разрывов различных типов.

Одним из направлений дальнейшего развития методик является реализация алгоритма VOF (Volume Of Fluid) [4], что позволит повысить точность численного решения вблизи контактных разрывов.

*Использованные источники:*

1. Куропатенко, В.Ф. Исследование влияния пульсирующего вдува на поток возле обтекаемого тела / В.Ф. Куропатенко, И.И. Кузнецова, И.Р. Макеева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2001. – № 3. – С. 60–71.
2. Куропатенко, В.Ф. Основы численных методов механики сплошных сред / В.Ф. Куропатенко, Е.С. Шестаковская. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2017.
3. Woodward, P.R. The Numerical Simulation of Two-Dimensional Fluid Flow with Strong Shocks / P.R. Woodward, P. Colella // Journal of Computational Physics. – 1984. – V. 54, № 1. – P. 115–173.
4. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nichols // Journal of Computational Physics. – 1981. – V. 39, № 1. – P. 201–225.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО АЗОТА НА ПОВЕРХНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Стаханов В. В., Юрин Д. О., Тараканов А. А.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[stakhanovvv@vniitf.ru](mailto:stakhanovvv@vniitf.ru)

В работе представлены результаты экспериментального исследования истечения жидкого азота на поверхность различных материалов: сталь, бетон и вода. Эксперименты проводились на стендах БАССЕЙН и БАССЕЙН-М. Определена скорость испарения и динамика разлива жидкого азота по поверхности исследуемых материалов, а также измерена температура газовой среды над поверхностью разлива. Полученные данные используются для уточнения моделей и расчетных методик, моделирующих истечение криогенных жидкостей.

*Ключевые слова: криогенная жидкость, утечка, испарение, вода, бетон, сталь*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LIQUID NITROGEN LEAKAGE ON THE SURFACE OF VARIOUS MATERIALS

V. V. Stakhanov, D. O. Yurin, A. A. Tarakanov

FSUE RFNC-VNIITF named after Academician E. I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region.  
[stakhanovvv@vniitf.ru](mailto:stakhanovvv@vniitf.ru)

In this paper the results of experimental investigation of liquid nitrogen leakage on the surface of various materials: steel, concrete and water was presented. Experiments were conducted on the POOL and POOL-M stands. The evaporation rate and dynamics of liquid nitrogen spill on the surface of materials was determined, also temperature of gas environment above surface was measured. Findings used for refinement of models and calculating methodologies to model of cryogenic liquid leakage.

*Keywords: cryogenic liquid, leakage, evaporation, water, concrete, steel*

Одним из способов хранения и транспортировки большого количества газа является его сжижение. Температура сжижения некоторых газов очень низкие, например, природный газ является жидким при минус 160 °С, азот – при минус 196 °С, а водород – при минус 253 °С. В случае аварийной разгерметизации резервуара со сжиженным горючим газом (например, сжиженный природный газ, водород) с проливом на поверхность при нормальных условиях окружающей среды, произойдет быстрое вскипание с образованием взрывоопасного облака в смеси с воздухом. На объем облака, и, как следствие, величину барических и термических нагрузок при воспламенении влияет площадь образовавшегося разлива и скорости его испарения с поверхности. Для валидации расчетных методик моделирования разлива криогенной жидкости с образованием облака испарений необходимо проведение экспериментальных исследований. В качестве модельной криогенной жидкости для отработки методик проведения испытаний, используемых при проведении исследования и регистрации данных, целесообразно использование безопасного невоспламеняемого жидкого азота.

Целью экспериментов является получение данных для валидации моделей испарения криогенных жидкостей, а также проверка и отработка методик проведения испытаний на примере невоспламеняемого жидкого азота.

Задачами экспериментов являются

– определение скорости испарения жидкого азота с различных типовых поверхностей (металл, бетон, вода),

– определение размера пролива жидкого азота, растекающегося по поверхности.

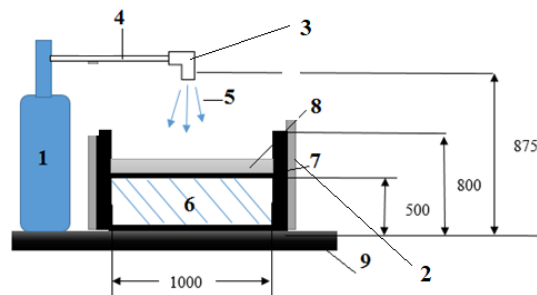
При проведении экспериментальных исследований пролива жидкого азота используются стенды БАССЕЙН-М и БАССЕЙН.

Стенд БАССЕЙН-М – сосуд из пенопласта с квадратным сечением размером 0,2 м и высотой 0,1 м. На дно сосуда размещается одна из площадок для пролива: стальная пластина



Ст3, толщиной 7 мм, бетонная плита М1000, толщиной 50 мм, либо вода, толщиной 50 мм.

Для исследования пролива жидкого азота большого масштаба используется стенд БАССЕЙН, схема которого представлена на рисунке 1. Стенд представляет собой стальной контейнер высотой 0,8 м с квадратным сечением размером 1 м. Толщина стенок контейнера равна 5 мм. Внутри контейнера устанавливается подложка из исследуемого материала: сталь Ст3, толщиной 5 мм, бетон М 1000, толщиной 50 мм, либо вода, толщиной 0,4 м. Жидкий азот подается через теплоизолированную воронку с изменяемым диаметром.



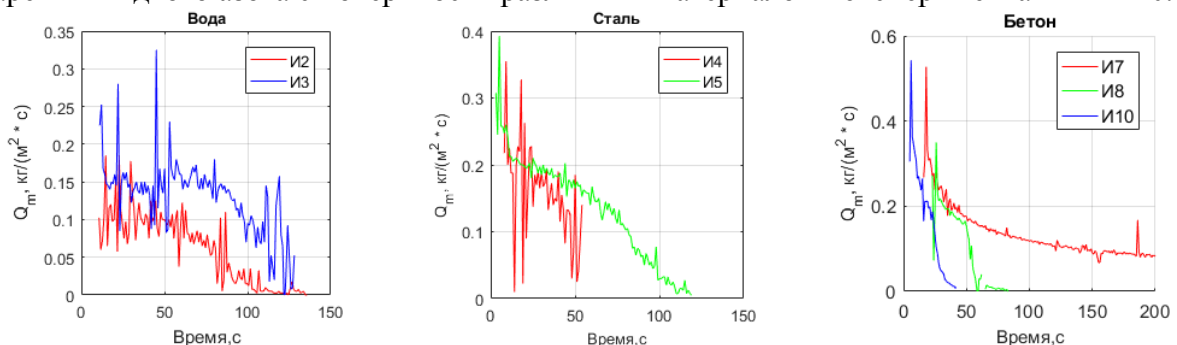
1 – емкость с жидким азотом, 2 – теплоизоляция, 3 – устройство для пролива, 4 – трубка для подачи жидкого азота, 5 – струя жидкого азота, 6 – вода, 7 – стальная пластина, 8 – бетонная плита, 9 – поверхность земли

Рисунок 1 – Схема стенда БАССЕЙН

При проведении экспериментов на стендах БАССЕЙН-М и БАССЕЙН производится измерение температуры: поверхности и в толще площадки для пролива жидкого азота; газовой среды над площадкой для пролива жидкого азота и окружающей среды. Для определения скорости испарения жидкого азота в экспериментах на стенде БАССЕЙН-М используются электронные весы.

### Результаты экспериментов

В экспериментах на БАССЕЙН-М проливалось различное количество жидкого азота: от 0,3 до 1,2 кг. На рисунке 2 представлены результаты измерения удельной скорости испарения жидкого азота с поверхности различных материалов в экспериментах И2–И10.



а) подложка – вода

б) подложка – сталь

в) подложка – бетон

Рисунок 2– Удельная скорость испарения жидкого азота с поверхности подложки

Результаты измерений скорости испарения жидкого азота (с учетом отличий в составе бетона) согласуются с данными в открытой литературе [1–4].

В экспериментах на стенде БАССЕЙН проливалось 8 кг (около 10 л) жидкого азота. На рисунке 3 представлена динамика разлива жидкого азота вдоль различных направлений на поверхности подложки при проливе через отверстия различных диаметров.

вода

сталь

бетон

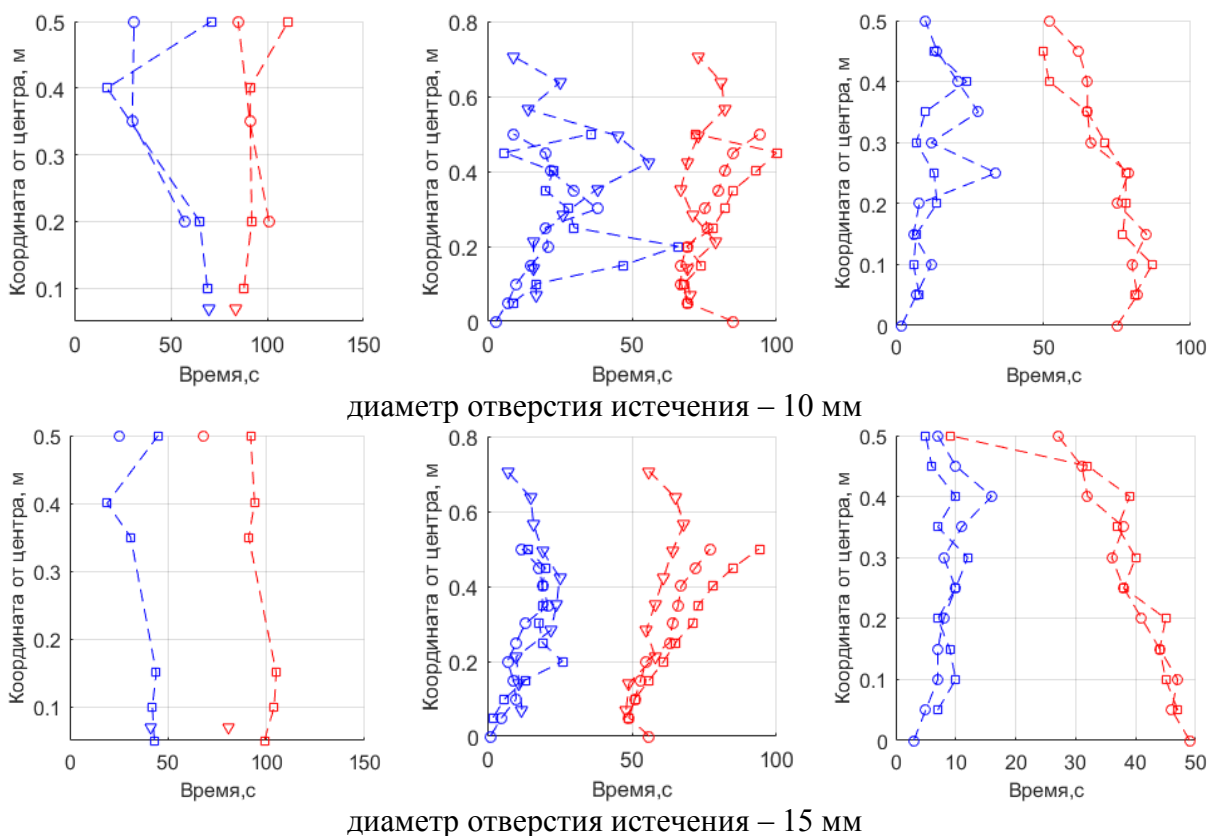


Рисунок 3 – Динамика распространения разлива жидкого азота на поверхности подложки при истечении через отверстия различных диаметров. Синие кривые – натекание жидкого азота, красные – удаление/утекание; ○ – вдоль оси X; □ – вдоль оси Y, ▽ – вдоль диагонали.

Полученные данные используются для уточнения параметров используемой модели испарения, а также для валидации разработанных расчетных методик, описывающих процессы растекания и испарения криогенных жидкостей. Используемые в экспериментах методики могут быть применены при проведении исследований прочих криогенных жидкостей, в частности, жидкого водорода.

*Использованные источники:*

1. Olewski T., Vechot L., Mannan S. Study of the Vaporization Rate of Liquid Nitrogen by Small and Medium-Scale Experiments // The Italian Association of Chemical Engineering. – 2013. – 31. – 133-138.
2. Olewski T., Vechot L., Mannan, S. Validation of liquid nitrogen vaporization rate by small scale experiments and analysis of the conductive heat flux from the concrete // In Press, Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2014. – 1-6.
3. Quraishy Syed [et al.]. Modelling of Transition and Nucleate Boiling of Liquid Nitrogen Spill on Concrete // Hazards 25 Symposium Series. – 2015. – № 160.
4. Vechot L., Olewski T. Small scale experimental study of vaporization fluxes of liquid nitrogen released on water // Hazards 24 Symposium Series. – №159.

## МОДЕЛИ ТЕРМОДИНАМИКИ МАТЕРИАЛОВ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

Хищенко К.В.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», Долгопрудный,  
Московская обл.

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск  
[konst@ihed.ras.ru](mailto:konst@ihed.ras.ru)

Аннотация. Рассматриваются модели уравнений состояния различных материалов в широком диапазоне термодинамических параметров для решения задач механики сплошных сред. Приводятся примеры результатов построения уравнений состояния для элементов и соединений в сопоставлении с данными экспериментов при высоких плотностях энергии.

*Ключевые слова: уравнения состояния, алюминий, железо, диоксид кремния, ударные волны, высокие давления*

## MODELS OF THERMODYNAMICS OF MATERIALS IN PROBLEMS OF CONTINUUM MECHANICS AT HIGH ENERGY DENSITIES

Khishchenko K.V.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

<sup>3</sup>South Ural State University, Chelyabinsk

[konst@ihed.ras.ru](mailto:konst@ihed.ras.ru)

Abstract. Models of the equations of state of various materials in a wide range of thermodynamic parameters are considered to solve problems in continuum mechanics. Examples of the results of constructing equations of state for elements and compounds are given in comparison with experimental data at high energy densities.

*Key words: equations of state, aluminum, iron, silica, shock waves, high pressures*

Для решения задач механики сплошных сред [1] требуется знать уравнения состояния материалов во всей реализуемой области термодинамических параметров. Интенсивное импульсное воздействие на вещество приводит к росту внутренней энергии и, возможно, давления, плотности и температуры на стадии энерговыделения и к уменьшению всех этих величин на последующей стадии разгрузки [2]. Моделирование динамики протекающих при этом физических процессов путем решения системы уравнений движения среды становится возможным при замыкании этой системы определяющими соотношениями между термодинамическими величинами во всем реализуемом диапазоне параметров. В общем случае такими соотношениями служат канонические уравнения состояния, задаваемые в виде функции термодинамического потенциала от независимых переменных, через которые записывается его полный дифференциал. Например, в виде функции свободной энергии от объема и температуры  $F = F(V, T)$  или внутренней энергии от объема и энтропии  $E = E(V, S)$ .

Построение уравнений состояния конкретных материалов традиционно осуществляется в рамках полумпирического подхода, в котором функциональная зависимость термодинамического потенциала определяется из теоретических представлений, а для нахождения констант в этой зависимости привлекается имеющаяся опытная информация [2]. При этом важным является наличие экспериментальных данных в возможно более широком диапазоне достигаемых параметров. Для изучения в экспериментах со сплошными и пористыми образ-

цами материалов в волнах ударного сжатия и изоэнтропической разгрузки доступна обширная область плотностей и давлений. Полученные данные могут быть обобщены в форме функции внутренней энергии от объема и давления  $E = E(V, P)$ . Такое уравнение состояния может быть использовано при моделировании адиабатических процессов [3—5].

В настоящей работе рассматриваются варианты моделей для построения уравнений состояния различных материалов в широком диапазоне изменения термодинамических параметров. Приводятся примеры уравнений состояния на основе разных моделей для различных элементов (алюминий, железо и другие) и соединений (диоксид кремния и другие) при высоких плотностях энергии. Результаты расчетов по этим уравнениям состояния даются в сравнении с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов в диапазоне от нормальных условий до экстремально высоких достигнутых давлений (в частности, для алюминия до 400 ГПа [6—8]).

Представленные уравнения состояния могут быть эффективно использованы для решения задач механики сплошных сред при высоких плотностях энергии.

*Использованные источники:*

1. Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортов В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. — Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1988.
2. Куропатенко В.Ф., Шестаковская Е.С. Основы численных методов механики сплошных сред. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017.
3. Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Волошин Н.П., Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В., Симоненко В.А., Черноволук Б.Т. Экспериментальное подтверждение оболочечных эффектов на ударных адиабатах алюминия и свинца // Письма в ЖЭТФ. — 1986. — Т. 43, № 5. — С. 241—244.
4. Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Волошин Н.П., Коваленко Г.В., Куропатенко В.Ф., Симоненко В.А., Черноволук Б.Т. Экспериментальное изучение оболочечных эффектов на ударных адиабатах конденсированных веществ // ЖЭТФ. — 1987. — Т. 93, № 2. — С. 613—626.
5. Владимиров А.С., Волошин Н.П., Ногин В.Н., Петровцев А.В., Симоненко В.А. Ударная сжимаемость алюминия при давлениях  $p \geq 1$  Гбар // Письма в ЖЭТФ. — 1984. — Т. 39, № 2. — С. 69—72.
6. Семенов А.Ю., Абросимов С.А., Стучебрюхов И.А., Хищенко К.В. Изучение динамики волновых процессов сжатия и расширения в палладии при пикосекундном лазерном воздействии // ТВТ. — 2023. — Т. 61, № 4. — С. 542—548.
7. Хищенко К.В. Уравнение состояния алюминия при высоких давлениях // ТВТ. — 2023. — Т. 63, № 3. — С. 477—480.
8. Хищенко К.В. Уравнение состояния циркония при высоких давлениях // ТВТ. — 2023. — Т. 63, № 5. — С. 783—786.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ЦИЛИНДР-ТЕСТ

Шестаковская Е.С., Яловец А.П., Клиначева Н.Л., Шершнева О.А.  
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск,  
Челябинская обл.  
[shestakovskaias@susu.ru](mailto:shestakovskaias@susu.ru)

В работе представлен программный комплекс для математического моделирования сопряженных задач аэрогидроупругости. Для апробации разработанного численного алгоритма, проведено численное моделирование задачи в постановке, соответствующей эксперименту «цилиндр-тест» по разлету медной цилиндрической трубки под воздействием продуктов взрыва.

*Ключевые слова: сопряженные задачи аэрогидроупругости, математические модели механики сплошных сред, численные методы механики сплошных сред, деформируемое твердое тело, детонация, цилиндр-тест*

## MATHEMATICAL MODELING OF THE CYLINDER TEST EXPERIMENT

E.S. Shestakovskaya, A.P. Yalovets, N.L. Klinacheva, O.A. Shershneva  
FSAEIHЕ “South Ural State University (national research university)”, Chelyabinsk, Chelyabinsk  
region  
[shestakovskaias@susu.ru](mailto:shestakovskaias@susu.ru)

The paper presents a software package for mathematical modeling of coupled problems of aerohydroelasticity. To test the developed numerical algorithm, a numerical simulation of the problem was carried out in a formulation corresponding to the cylinder test experiment on the expansion of a copper cylindrical tube under the influence of explosion products.

*Key words: coupled problems of aerohydroelasticity, mathematical models of continuum mechanics, numerical methods of continuum mechanics, deformable solid body, detonation, cylinder test*

В настоящее время для решения сопряженных задач аэрогидроупругости активно развиваются методики, использующие различные программные модули для расчета напряженно-деформированного состояния твердого тела и аэрогидродинамики, дополненные модулем сопряжения граничных условий, описывающих обмен энергией и импульсом на контактных границах. Такой подход выглядит предпочтительным, так как для каждой области (лагранжевой или эйлеровой) можно использовать независимые сетки, математические модели и методы реализации этих моделей, наиболее подходящие для описания поведения жидкости, газа или конденсированных сред.

В данной работе представлен программный комплекс, в котором реализован независимый расчет лагранжевой и эйлеровой областей сопряженной задачи собственными программными модулями и модуль сопряжения граничных условий лагранжевых и эйлеровых областей на каждом счетном временном шаге.

Для описания течений конденсированных сред использована математическая модель двумерных упругопластических течений среды в лагранжевых координатах [1,2]. Для описания течений газа использована математическая модель двумерных газодинамических течений среды в эйлеровых координатах. Для описания термодинамических свойств различных конденсированных материалов используется уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена [3], для описания термодинамических свойств продуктов взрыва различных взрывчатых веществ – уравнение состояния в форме JWL [4]. В обоих случаях система уравнений механики сплошных сред записана с учетом необратимости реальных физических

процессов, для чего в уравнениях использованы неравновесные напряжения, которые учитывают конечное время релаксации системы к равновесному состоянию.

Для численного решения предложенной математической модели в лагранжевых и эйлеровых координатах использовался полуаналитический метод [2], отличительной особенностью которого является то, что только пространственные производные заменяются конечными разностями. В этом случае система уравнений МСС сводится к системе дифференциальных уравнений, которые допускают приближенное аналитическое решение на некотором временном шаге, данный метод обеспечивает высокую точность выполнения законов сохранения, а также характеризуется высокой устойчивостью решения при моделировании течений конденсированных сред в областях со сложной конфигурацией.

В настоящей работе проведено численное моделирование ряда задач о разлете цилиндрической трубки под воздействием продуктов взрыва в постановке, соответствующей экспериментам «цилиндр-тест» для различных взрывчатых веществ и геометрий трубки. Актуальность работы обоснована тем, что методика «цилиндр-тест» является одним из способов изучения свойств взрывчатых веществ и служат основой для нахождения коэффициентов уравнений состояния, описывающих изэнтропы расширяющихся продуктов взрыва. Результаты численного моделирования одной из задач представлены ниже.

**Постановка задачи.** Рассматривается цилиндрическая трубка из меди, заполненная взрывчатым веществом (ТЭН). Задача имеет осевую симметрию ( $z$  – ось симметрии). Геометрия: начальная длина  $L_0=30,5$  см и внутренний радиус  $R_{in}=1,27$  см, внешний радиус  $R_{out}=1,53$  см [5].

На рис.1 представлена динамика разлета трубки на момент времени  $t=33$  мкс. На рис.2 приводятся результаты расчетов зависимости приращения внешнего радиуса медной трубки от времени  $\Delta R_{out} = R_{out}(t) - R_{out}(0)$  для различных точек регистрации. Приращения радиуса рассчитывались для точек  $z_1=7$  см,  $z_2=15$  см,  $z_3=20$  см. За момент начала регистрации изменения радиуса брался момент достижения фронтом детонации данной координаты. Результаты данного расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными [5].

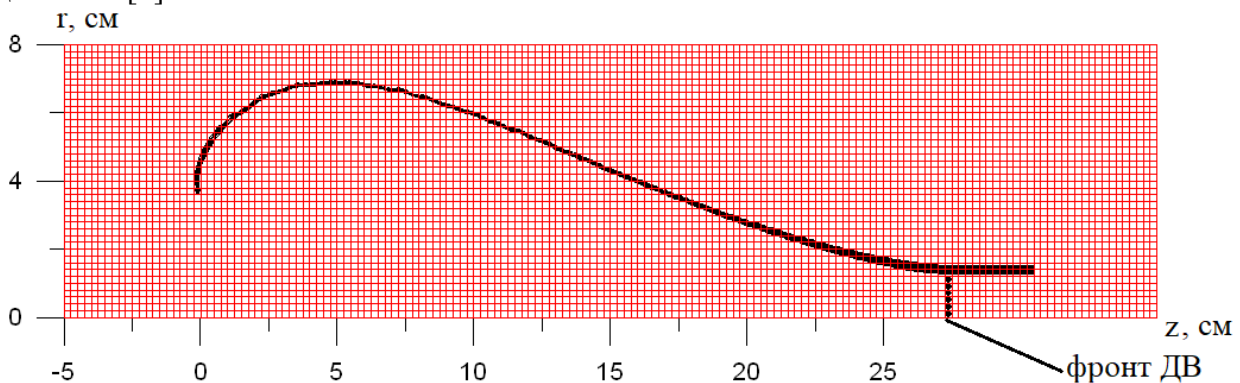


Рис. 1. Динамика разлета трубки на момент времени  $t=33$  мкс.



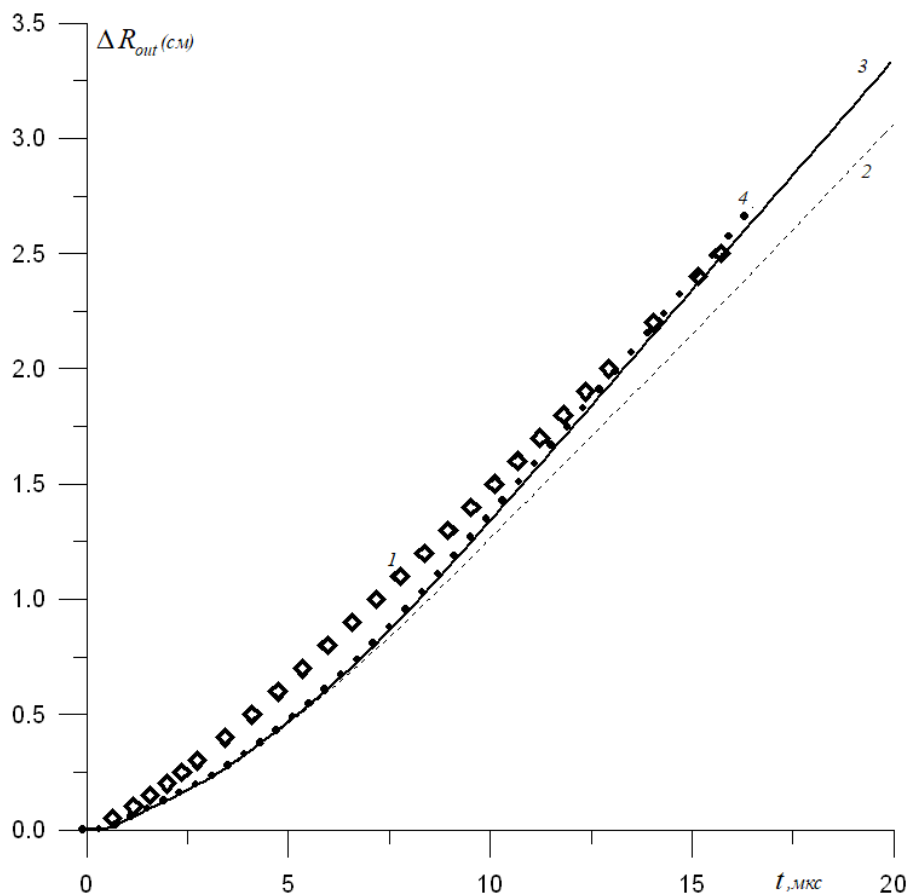


Рис. 2. Изменение внешнего радиуса трубки во времени: 1- эксперимент [5], 2, 3, 4 – численный расчет в сечении с координатами  $z_1, z_2, z_3$  соответственно.

**Заключение.** Построена математическая модель, включающая в себя две системы уравнений механики сплошных сред: первую – для моделирования упруго-пластических течений в лагранжевых координатах, вторую – для моделирования газодинамических течений в эйлеровых координатах. Данная модель реализована в программном комплексе, который включает два соответствующих модуля, дополненных модулем сопряжения граничных условий. Проведенные тестовые расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, разработанный программный комплекс позволит успешно моделировать ряд прикладных задач аэрогидроупругости, связанных с взаимодействием газодинамических течений с подвижными деформируемыми твердыми телами.

*Использованные источники:*

1. Жарков В.Н., Калинин В.А. Уравнения состояния при высоких температурах и давлениях / В.Н. Жарков, В.А. Калинин – Москва: Наука, 1968. -312с.
2. Физика взрыва.3-е изд./ под ред. Л. П. Орленко. — Москва: Физматлит, 2002. — Т.1.
3. Яловец, А.П. Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц // Прикладная механика и техническая физика. – 1997. – Т.38. – № 1. – С. 151–166.
4. Klinacheva, N. L. Modelling of Shock Wave Experiments on Two-Fold Compression of Polymethyl Methacrylate / N. L. Klinacheva, E. S. Shestakovskaya, A. P. Yalovets // Journal of Computational and Engineering Mathematics. – 2022. – Vol. 9. – No. 2. – P. 26-38.
5. Lee E. L, Hornig H. C. and Kury J. W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products, UCRL-50422. -Livermore (CA). – 1968.

## УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ ДЛЯ РАЗНЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

Яковлев С.А., Безгоднов Е.В., Пасюков С.Д., Никифоров М.И., Тараканов А.А., Серебряк В.Г.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[yakovlevsa@vniitf.ru](mailto:yakovlevsa@vniitf.ru)

В работе демонстрируются результаты экспериментов на вертикально ориентированной ударной трубе БМ-Т, предназначенной для исследования характеристик горения и определения концентрационных пределов ускорения пламени в равномерно перемешанных водородосодержащих смесях. Для рассмотрения влияния параметров внешней среды на процесс горения проводились исследования при варьировании начальной температуры и давления смеси, а также коэффициента загромождения пространства кольцевыми перегородками. Результаты исследования свидетельствуют о смещении нижнего концентрационного предела ускорения пламени при изменении начальных условий. Данный факт необходимо учитывать на этапе проектирования объектов водородной энергетики или для корректировки существующих критериев.

*Ключевые слова: водородная энергетика, концентрационный предел, дефлаграция, переход из горения в детонацию, водородная безопасность*

## FLAME ACCELERATION IN HYDROGEN-AIR MIXTURES FOR DIFFERENT INITIAL CONDITIONS IN A SHOCK TUBE

S.A. Yakovlev, E.V. Bezgodov, S.D. Pasyukov, M.I. Nikiforov, A.A. Tarakanov, V.G. Serebryak  
FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia  
[yakovlevsa@vniitf.ru](mailto:yakovlevsa@vniitf.ru)

The work shows the results of experiments on a vertically oriented shock tube BM-T, designed to study of flame behavior and concentration limits of flame acceleration in homogeneous hydrogen mixtures. Influence of blockage ratio, temperature and pressure on the process of flame acceleration was investigated. The results of investigation shows that concentration limits of flame acceleration are shifted by variation of initial condition. This fact must be taken into account at the design stage of hydrogen energy facilities or to adjust existing criteria.

*Keywords: hydrogen energy, concentration limit, deflagration, deflagration to detonation transition, hydrogen safety*

Водород является экологически чистым топливом с наибольшим выделением энергии на единицу массы, что делает его перспективным энергоносителем. Однако из-за своей высокой реакционной способности с окислителями, его использование накладывает высокие требования к взрывобезопасности [1].

Одной из вероятных аварийных ситуаций, которые могут произойти на объектах водородной энергетики, является утечка водорода из газовой магистрали или сосудов. В результате разгерметизации образуются локальные области со взрывоопасными смесями водорода с воздухом, способные при их зажигании нанести существенный ущерб близлежащему оборудованию, здоровью людей или инициировать каскадную аварию. Стоит учитывать, что многие технологические процессы, как правило, протекают при повышенных температуре и давлении. Это может повлиять на характеристики горения водородосодержащих смесей [2].

Обоснование водородной безопасности, зачастую, проводят с помощью численного моделирования [1]. Оценку численных методик (верификацию) необходимо проводить на результатах экспериментальных исследований.

Для исследования процесса ускорения пламени в равномерно перемешанных водородосодержащих смесях в ФГУП «РФЯЦ—ВНИИТФ им. академика Е.И. Забахина» разработана установка БМ-Т. Описание установки и регламент экспериментов представлен в [3]. В экспериментах использовались 12 фотодиодов, предназначенных для фиксации времени прихода фронта пламени, и 12 тензометрических датчиков давления МИДА–ДИ–12П–082–Ех–В с относительной погрешностью измерений  $\pm 6\%$ . На рисунке 1 представлен пример определения положения фронта пламени по профилям сигналов измерительного оборудования.

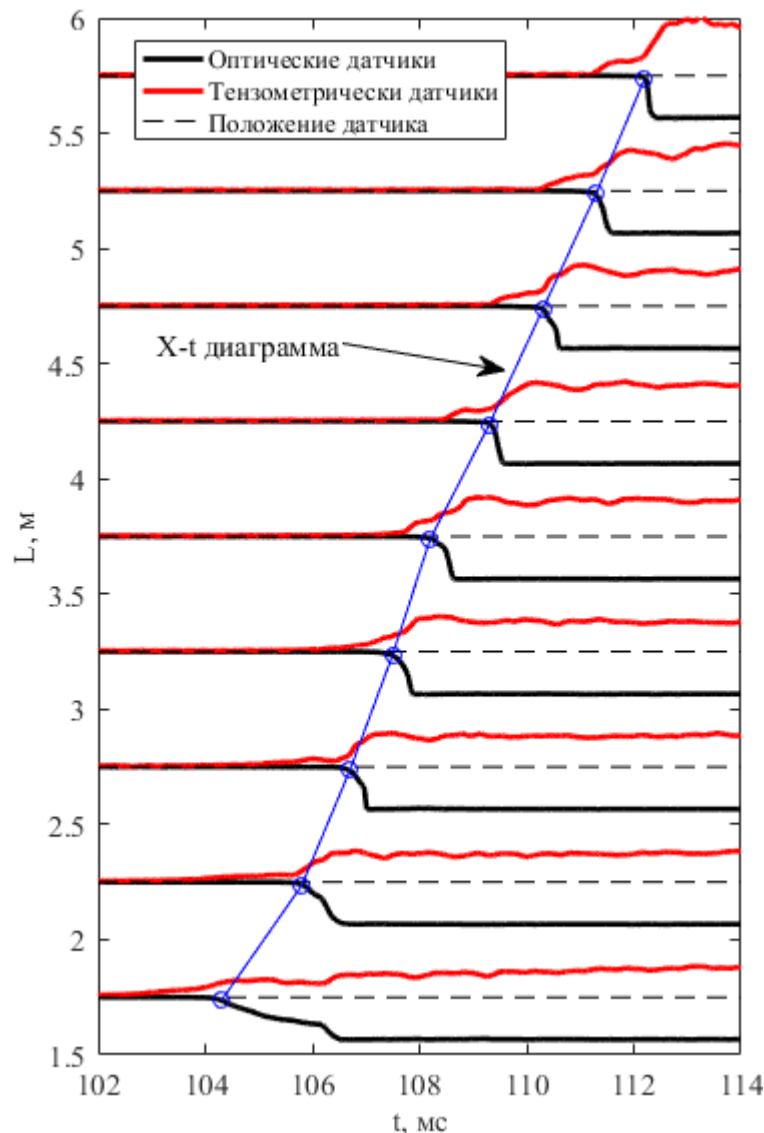


Рисунок 1. Пример определения положения фронта пламени по профилям сигналов измерительного оборудования

В предыдущей работе отмечалось, что усиленное внимание должно быть направлено на уточнение предела самораспространяющегося дефлаграционного горения, способного к переходу в быструю дефлаграцию и детонационно-подобное пламя [3]. Нижним концентрационным пределом быстрой дефлаграции является минимальное значение объемной доли топлива, при котором пламя может распространяться в режиме быстрой

дефлаграции (скорость распространения фронта пламени превышает скорость звука в реагентах или половину скорости звука в продуктах горения [1, 4]).

По результатам работы [3] найден коэффициент загромождения перегородок, при котором пламя распространяется в режиме быстрой дефлаграции уже при 9,5% по объемному содержанию водорода в горизонтально ориентированной трубе. Переход от горизонтальной к вертикальной постановке позволил уменьшить нижний концентрационный предел быстрой дефлаграции до 9% по содержанию водорода.

В рамках настоящей работы было проведено пять серий экспериментов в вертикально ориентированной установке БМ-Т. В первой серии уменьшили внутренний диаметр кольцевых перегородок, тем самым поменяв коэффициент загромождения на 0,75, что практически не оказало влияния на предел ускорения. Во второй и третьей сериях экспериментов изменяли начальную температуру, в четвертой и пятой сериях повышали давление смеси перед зажиганием, что способствовало смещению концентрационного предела ускорения пламени.

Монооксид углерода является одной из компонент технологий на объектах крупнотоннажного производства водорода [5], поэтому представляет интерес провести экспериментальные исследования влияния примеси монооксида углерода на концентрационный предел ускорения пламени.

Также планируется определить минимальное и максимальное объемное содержание водорода в смеси при котором пламя может распространяться в режиме детонации.

*Использованные источники:*

1. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008 г. — 288 с.
2. Безгодов Е.В., Пасюков С.Д., Никифоров М.В., и др. Предварительные результаты экспериментов по ускорению пламен в бедных смесях водородно-воздух для горизонтальной и вертикальной трубы. — В сборнике Научная сессия НИЯУ МИФИ., г. Снежинск, СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022, 72—74 с.
3. Фатеев С.А., Петрунин В.В., Кодочигов Г.Н. и др. Развитие технологий атомно-водородной энергетики в госкорпорации «Росатом». — Атомная энергия, 2022, № 133, 243—250 с.
4. Dorofeev S., Kuznetsov M., Alekseev V., e.a. Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures. — J. Loss Prev. Proc. Ind., 2001, v. 14, p. 583—589.
5. Scarpa R., Studer E., Kudriakov S., e.a. Influence of initial pressure on hydrogen/air flame acceleration during severe accident in NPP. — Int. j. Hydrogen Energy, 2019, v. 44, p. 9009-9017.

## ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Ярушин К. М.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

[costia.yarushin@yandex.ru](mailto:costia.yarushin@yandex.ru)

Аннотация. В статье представлен пример использования метода электротомографии для построения геоэлектрической модели техногенных грунтов, слагающих массив хвостохранилища обогатительной фабрики №5 Мирнинского горно-обогатительного комбината (г. Мирный, Якутия).

*Ключевые слова:* Геофизические исследования, электротомография, интерпретация, геоэлектрическая модель среды, удельное электрическое сопротивление.

## CONSTRUCTION OF A GEOELECTRIC MODEL OF TECHNOGENIC SOILS BASED ON ELECTROTOMOGRAPHY DATA

Yarushin K. M.

*Snezhinsk Physic Institute of the National Research Nuclear University MEPhI*

[costia.yarushin@yandex.ru](mailto:costia.yarushin@yandex.ru)

Summary. The article presents an example of the use of the electrotomography method to build a geoelectric model of technogenic soils that make up the massif of the tailings storage of the processing plant №5 of the Mirninsky mining and processing plant (Mirny city, Yakutia)

*Key words:* Geophysical studies, electrotomography, interpretation, geoelectric model, electrical resistivity.

Образование отходов (хвостов) обогащения руд полезных ископаемых является неотъемлемой частью работы горно-обогатительных комбинатов. В зонах размещения хвостов сооружаются техногенные структуры – хвостохранилища. Хвостохранилища зачастую являются объектами угрозы экологии. Нарушения правил их строительства и эксплуатации приводят к техногенным авариям, а хранящиеся в них отходы становятся источником загрязнения близлежащих почв и грунтовых вод.

Исследования физического состояния техногенных ландшафтов, сформированных отходами обогащения, являются обязательным условием безопасной эксплуатации хвостохранилищ [1]. Данные полученные при исследованиях, могут быть использованы при разработке мероприятий, направленных на защиту экологии и предупреждение технологических инцидентов.

Главной причиной возникновения аварийных ситуаций на объектах хранения хвостов является возникновение зон сквозной фильтрации техногенных вод [2]. В связи с этим, изучение технического состояния хвостохранилищ целесообразно проводить с применением геофизических методов, основанных на использовании различных методик электроразведки, в частности – электротомографии. Основопологающим фактором применения методов электроразведки в условиях криолитозоны является значительная дифференциация коренных пород и техногенных грунтов по параметру удельного электрического сопротивления в зависимости от их литологического состава, водонасыщенности и температурного состояния. В результате проведения электроразведочных работ методом электротомографии аномальные зоны, соответствующие талым грунтам и зонам сквозной фильтрации, выделяются уверенно и однозначно.

Таким образом, целью геофизических исследований является построение геоэлектрической модели геологической среды по данным электротомографии для определения геокриологического строения и физико-механических свойств грунтов слагающих техногенный массив.

**Объект исследования.** Хвостохранилище обогатительной фабрики № 5 расположено на юго-восточной окраине г. Мирный, на ручье Зимний, правом притоке р. Ирелях. Площадь зоны складирования техногенных грунтов составляет 150 га. Хвостохранилище использовалось для размещения и длительного хранения 20 млн. м<sup>3</sup> отходов обогатительной фабрики № 5 Мирнинского ГОК до 2004 г [3].

**Методика исследования.** Для решения поставленной задачи применяется методика сплошных электрических зондирований (электротомография) по системе субпараллельных профилей. В качестве измерительной аппаратуры используется электроразведочная станция «Скала-64». Методика исследований основана на изучении распределения поля постоянного электрического тока от источника с известными параметрами в проводящей геологической среде. Для создания поля и измерения его напряжённости используется совокупность электродов А-М-N-B, в которой электроды А-B являются питающими (на них подается ток), а электроды М-N – измерительными (между ними производится замер напряжённости электрического поля) (см. рисунок 1).

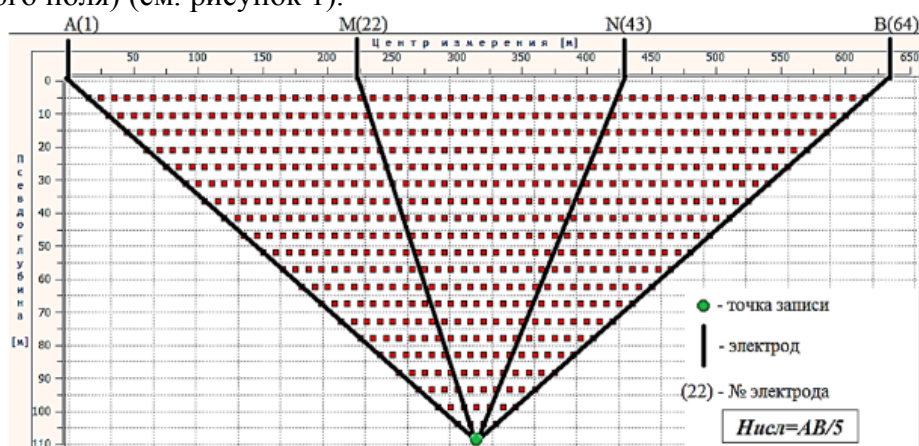


Рисунок 1. Схема измерений методом сплошных электрических зондирований (рабочее окно «СКАЛА-64»)

Измеренные ток и разность потенциалов позволяют рассчитать кажущееся удельное электрическое сопротивление ( $\rho_{\text{каж}}$ , Ом·м) – электрическое поле, нормированное по параметрам установки таким образом, чтобы в однородном полупространстве кажущееся сопротивление совпадало с истинным удельным сопротивлением [4].

Первичная камеральная обработка данных, полученных при полевых работах, выполняется в программе «RiPPP». Для двумерной интерпретации профильных данных электротомографии используется программа «ZondRes2D». При помощи «ZondRes2D» решаются прямая и обратная задачи электротомографии. Обратная задача (инверсия) позволяет из измеренных значений разности потенциалов получить двумерное распределение удельных сопротивлений [5]. В качестве входных данных для этого используются координаты электродов, высоты, измеренные значения разности потенциалов и дисперсии измерений, предварительно обработанные в программе «RiPPP». Таким образом, основываясь только на измерениях с поверхности земли, формируется двумерная геоэлектрическую модель изучаемой геологической среды, позволяющая описывать физическое состояние хвостохранилища на различных глубинах.

**Результаты исследований.** Данные для построения двумерных геоэлектрических моделей изучаемой области были получены при измерениях по двум параллельным геофизическим профилям, проложенным вдоль простирания хвостохранилища. Длина каждого профиля составила 950 м, расстояние между профилями 300 м. (см. рисунок 2).



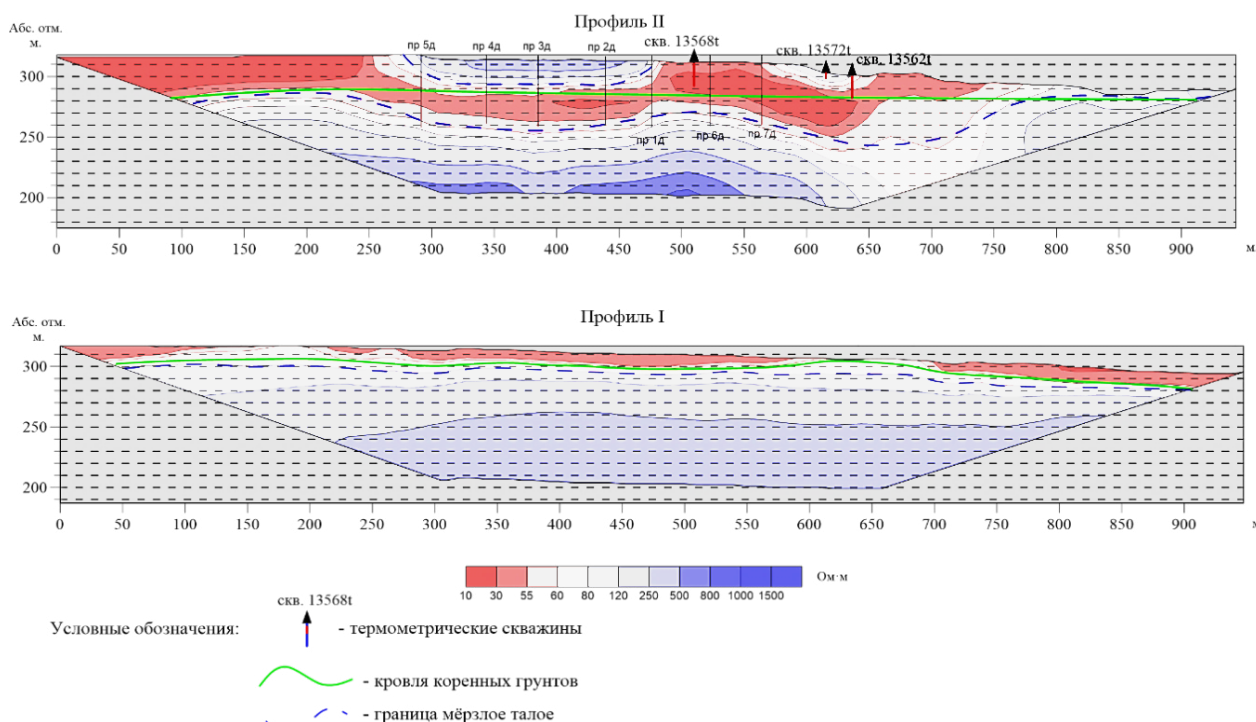


Рисунок 2. Геоэлектрические модели техногенной среды хвостохранилища по профилям I и II.

Основываясь на построенных геоэлектрических моделях, можно выделить основные критерии характеризующие геокриологическую обстановку на исследуемом участке.

*Профиль I.* Верхняя часть разреза мощностью 1-15 метров представлена тальми грунтами с удельными электрическими сопротивлениями (УЭС) 10-60 Ом·м. Грунты с УЭС 120-1500 Ом·м зафиксированы на всю глубину исследования и по всей протяжённости разреза, являются мерзлыми грунтами. Растепление коренных пород не наблюдается. Зоны разгрузки фильтрационных вод отсутствуют. Риск развития термокарстовых процессов минимален.

*Профиль II.* В диапазоне ПК0-ПК230 верхняя часть разреза представлена грунтами с УЭС 10-30 Ом·м, зона определена, как текучие водонасыщенные грунты мощностью 10-25 метров. На отрезке ПК270-ПК470 фиксируется высокоомная область с УЭС 120-500 Ом·м мощностью 10-20 метров, предположительно обусловлена мёрзлыми намывными грунтами. На отметках 290-270 м (30-50 м от дневной поверхности) в коренных грунтах на участке ПК250-ПК650 зафиксирована низкоомная аномалия, соответствует тальми коренным грунтам. Под техногенными грунтами профиля картируется растепление (деградация) коренных пород по всей длине профиля до отм. 250-200 м (50-100 м от дневной поверхности).

К потенциально опасным участкам развития термокарстовых процессов по выполненной сети геофизических наблюдений относится зона ПК250-ПК750 профиля II. Участок характеризуется, как опасный, на основании непосредственной близости грунтов, находящихся в текучем состоянии к месту разгрузки фильтрационных потоков и резкому понижению поверхности.

**Заключение.** Таким образом, рассчитанные геоэлектрические модели техногенных грунтов позволили выделить на участке исследований зону фильтрации техногенных вод и оконтурить её границы. Применяемая методика также позволила выделить подошву техногенных и кровлю коренных грунтов основания хвостохранилища. По результатам геофизических исследований рекомендуется выполнить заверочное бурение на профиле II для подтверждения результатов интерпретации. Для снижения риска возникновения техногенных инцидентов необходимо выполнить работы, направленные на повышение устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища.

*Использованные источники:*

1. Бажин К.И. Использование электротомографии для изучения состояния гидротехнических сооружений в условиях криолитозоны / К.И. Бажин // Геофизика и геомеханика. – 2015. – №2. – С. 53-55.
2. Зырянова А.В. Изучение фильтрации шламовых вод методом электротомографии / А.В. Зырянова // X I X Уральская Молодежная научная школа по геофизике, сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – Вып. 25. – С. 69-71.
3. «Площадка складирования хвостов обогатительной фабрики (ОФ) № 5»: технический отчет / Якутнипроалмаз. – Мирный, 2016. – 78 с. – Арх. № 2577.
4. Инструкция по эксплуатации многоэлектродной электроразведочной станции «СКАЛА-64» / ООО «КБ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ». – Новосибирск, 2015. – 43 с.
5. Руководство пользователя ZondRes2D. / «Zond software» – Санкт-Петербург, 2014. – 67 с.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

Бугаенко А.А.<sup>1,2</sup>, Крутова И.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.

[BugaenkoAA@vniitf.ru](mailto:BugaenkoAA@vniitf.ru)

Аннотация. Для линеаризованной системы уравнений Навье-Стокса при учете действия сил тяжести и Кориолиса численно моделируется возникновение и развитие восходящего закрученного потока с использованием продува вверх по трубе.

Ключевые слова: система уравнений Навье-Стокса, сила Кориолиса, линеаризация, численное моделирование, продув.

## NUMERICAL STUDY OF A LINEARIZED COMPLETE SYSTEM OF NAVIER-STOKES EQUATIONS

Bugaenko A.A.<sup>1,2</sup>, Krutova I.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSUE RFYATS-VNIITF named after Academician E.I. Zababakhina", Snezhinsk, Chelyabinsk region

<sup>2</sup> Federal State Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPHI", Snezhinsk, Chelyabinsk region.

[BugaenkoAA@vniitf.ru](mailto:BugaenkoAA@vniitf.ru)

Annotation. For the linearized system of Navier-Stokes equations, taking into account the action of gravity and Coriolis forces, the occurrence and development of an ascending swirling flow using blowing up the pipe is numerically modeled.

Keywords: Navier-Stokes equation system, Coriolis force ca, linearization, numerical modeling, purge.

Согласно предложенной в монографии [1] схеме возникновения и устойчивого существования восходящего закрученного потока (ВЗП) основными причинами устойчивого функционирования ВЗП являются: существование достаточно длительного по времени восходящего потока воздуха; вращение Земли, которое через действие силы Кориолиса придает существенную окружную скорость частицам воздуха в придонной части ВЗП. В статье описываются численные исследования по созданию стабильного окружного движения воздуха в придонной части ВЗП с применением вертикальной трубы с вентилятором вытяжного действия, направляющим воздух по трубе снизу вверх [2]. Численный расчет подобных течений газа позволяет дать конкретные предложения и рекомендации по возможному проведению крупномасштабного эксперимента по закрутке больших масс воздуха.

В работе рассматривается линеаризованная [3] полная система уравнений Навье-Стокса (ПСУНС) (1), в которой учтены сжимаемость газа и диссипативные эффекты вязкости и теплопроводности так, что общие законы сохранения массы, импульса и энергии выполняются. А также выполняются законы термодинамики, благодаря учету уравнений состояния.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t + \rho(u_x + v_y + w_z) = 0, \\ u_t + \frac{\rho_x}{\gamma} + \frac{T_x}{\gamma} = av - bw + \mu_0 \left( u_{xx} + \frac{3}{4}u_{yy} + \frac{3}{4}u_{zz} + \frac{1}{4}v_{xy} + \frac{1}{4}w_{xz} \right), \\ v_t + \frac{\rho_y}{\gamma} + \frac{T_y}{\gamma} = -au + \mu_0 \left( \frac{3}{4}v_{xx} + v_{yy} + \frac{3}{4}v_{zz} + \frac{1}{4}u_{xy} + \frac{1}{4}w_{yz} \right), \\ w_t + \frac{\rho_z}{\gamma} + \frac{T_z}{\gamma} = bu + \mu_0 \left( \frac{3}{4}w_{xx} + \frac{3}{4}w_{yy} + w_{zz} + \frac{1}{4}u_{xz} + \frac{1}{4}v_{yz} \right), \\ T_t + (\gamma - 1)(u_x + v_y + w_z) = k_0(T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}). \end{array} \right. \quad (1)$$

Численное решение системы при соответствующих начальных и граничных условиях, проводилось в расчетной области в виде прямоугольного параллелепипеда, размеры которого соответствуют размерам разных по интенсивности ВЗП [4]. Его нижняя грань совпадает с поверхностью Земли. Через квадратное отверстие в центре верхней грани расчетной области моделируется вертикальный плавный продув воздуха.

Численное моделирование течений в ВЗП малых масштабов. На рисунке 1 представлены результаты расчетов плотности, температуры, третьей и второй компоненты вектора скорости газа на высоте 0,25 м для двух различных моментов расчетного времени (0,1 с и 30 с), а также линии тока.

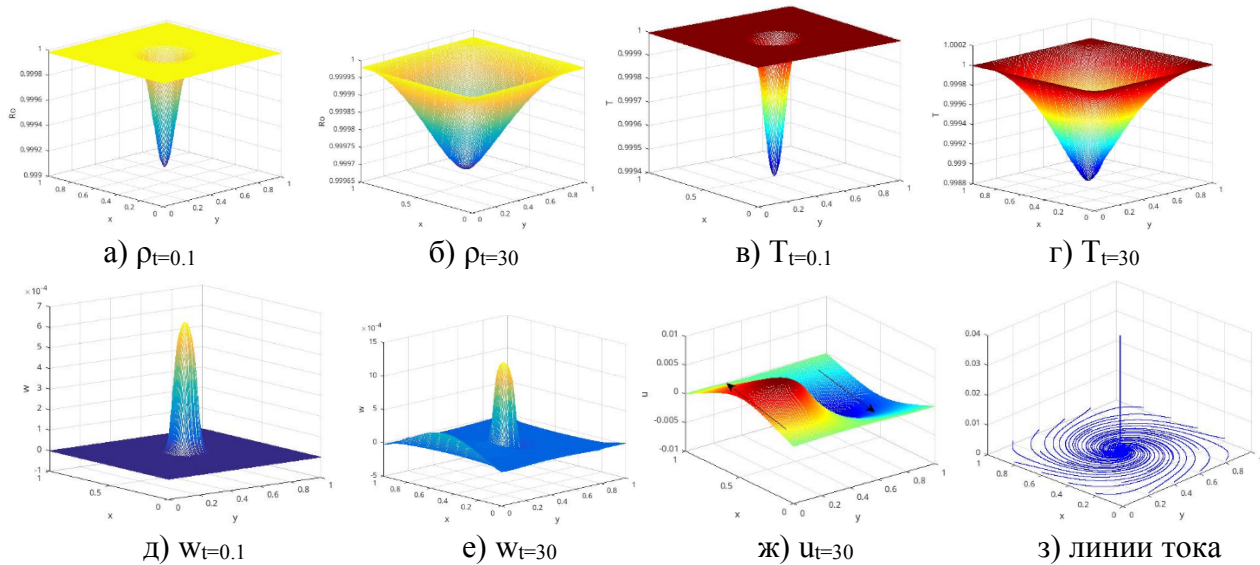


Рисунок 1 – Газодинамические характеристики течений в ВЗП малых масштабов

Численное моделирование течений в ВЗП средних масштабов. На рисунке 2 представлены результаты расчетов плотности, температуры, третьей и второй компоненты вектора скорости газа на высоте 1 м для двух различных моментов расчетного времени (0,5 с и 30 с), а также линии тока.

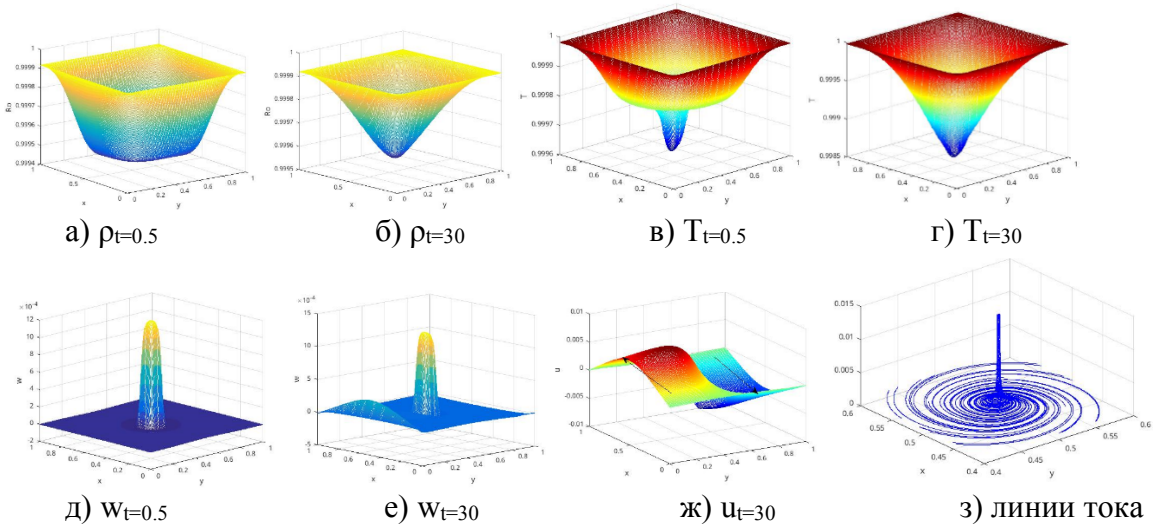


Рисунок 2 – Газодинамические характеристики течений в ВЗП средних масштабов

Численное моделирование течений в ВЗП больших масштабов. На рисунке 2 представлены результаты расчетов плотности, температуры, третьей и второй компоненты вектора скорости газа на высоте 500 м для двух различных моментов расчетного времени (1 с и 30 с), а также линии тока.



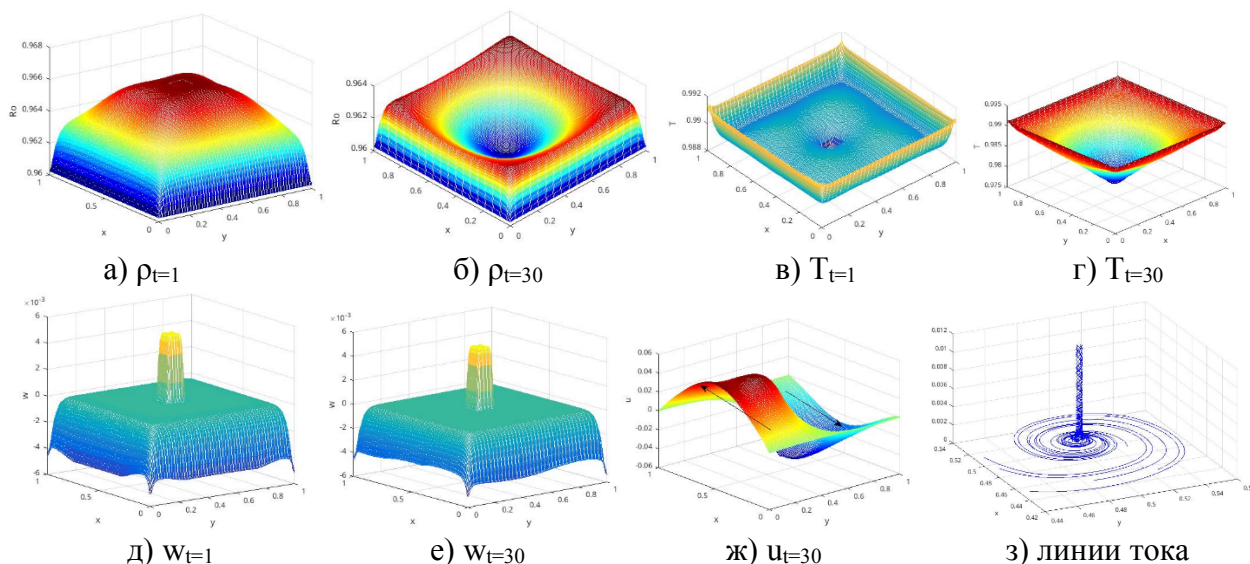


Рисунок 3 – Газодинамические характеристики течений в ВЗП больших масштабов

Общим в поведении термодинамических характеристик является то, что плотность газа по периметру расчетной области сохраняется постоянной и равной значению плотности стационарного распределения. В начальные моменты времени происходят колебания плотности в четвертом десятичном знаке, а с течением времени амплитуда колебаний плотности постепенно уменьшается и наблюдается плавное понижение плотности в центре расчетной области. При увеличении времени расчета процесс изменения плотности плавно выходит на стационарный режим. Поверхность плотности газа приобретает вид воронки с пониженной плотностью в центре расчетной области.

Несмотря на продув газа через верхнее отверстие, в результате численного решения линейризованной ПСУНС отмечается понижение температуры в центре расчетной области под отверстием продува. Периферийное же значение температуры соответствует постоянному значению начального стационарного распределения.

По мере приближения к центру расчетной области прослеживается осевая симметрия. Ось симметрии расположена вертикально, проходит через геометрический центр расчетной области и совпадает с центром отверстия продува газа через верхнюю плоскость расчетного параллелепипеда.

Особенностями в поведении вертикальной компоненты скорости частиц газа в расчетной области является близость ее значений к нулю во всех периферийных областях. В области продува вертикальная скорость постепенно растет в соответствии с законом продува и в сечении повторяет квадратный контур отверстия продува.

В начальные моменты времени на общем фоне нулевых по значению скоростей в центре расчетной области возникают зоны, в которых  $x$ -ые компоненты скорости отличны от нуля и противоположны по знаку. Стрелками на рисунках помечены направления движения частиц газа. В последующие моменты расчетного времени происходит заметное смещение областей с положительными и отрицательными значениями  $x$ -той компоненты скорости.

Такое пространственное перераспределение рассматриваемой компоненты скорости частиц газа означает, что вблизи геометрического центра расчетной области возникают встречные и разведенные в пространстве потоки газа, что равносильно возникновению вокруг вертикальной оси закрученного в положительном направлении движения частиц газа. Причем процесс сопровождается увеличением модулей скоростей и увеличением размеров этих областей, т.е. закрутка газа в положительном направлении усиливается.

Вторая компонента скорости имеет такие же особенности изменения от времени и поэтому описание здесь не приводится.

На слайде также представлены результаты трехмерных расчетов мгновенных линий тока частиц газа в области близкой к вертикальной части ВЗП. На рисунках видно, как постепенно происходит закрутка газа вблизи нижней плоскости расчетного параллелепипеда и процесс передачи вращательного движения сплошной среды в вертикальную часть ВЗП. Высота, с которой начинался процесс построения линий тока составлял порядка 0,0001 в безразмерных

единицах. Поэтому можно считать, что построенные мгновенные линии тока начинаются практически с подстилающей поверхности. Сформировавшаяся же вертикальная часть, которую видно на рисунках, представляет собой аналог (численную модель) хобота реального природного вихря.

*Использованные источники:*

1. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск : Наука, 2008. 96~с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. Екатеринбург: УрГУПС, 2020. 400 с.
3. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Линеаризованная система уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса. Снежинск: СФТИ, 2019. 60 с.
4. Баутин С.П. Скорость звука в многокомпонентной покоящейся среде // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, №3. – С. 35-44.



## АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО

Казачинский А.О., Крутова И.Ю.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

[a.kazachinskij@gmail.com](mailto:a.kazachinskij@gmail.com)

Исследование посвящено численному моделированию математической модели для исследования сложных течений политропного газа в восходящих закрученных потоках воздуха. В модели детально рассматриваются процессы возникновения и развития трехмерного стационарного движения воздуха, при иницировании закрутки потока силой Кориолиса – являющейся инерционной силой, возникающей от вращения Земли вокруг своей оси.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью понимания сути физических процессов, происходящих в восходящих потоках, необходимость тщательного и глубокого изучения природы возникновения вихрей (торнадо, смерчи, тропический циклон) для раннего предупреждения и эффективной борьбы с их разрушительными последствиями.

Для выбранной математической модели в виде системы уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса поставлены начальные условия, позволяющие численно находить решения для описания стационарного трехмерного течения газа в восходящих закрученных потоках.

Предложенная математическая модель позволяет дать оригинальную трактовку причины возникновения закрутки воздуха соответствующего направления. С помощью численного метода характеристик численно найдены решения для коэффициентов рядов, которые определяются через систему уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса, которая описывает трехмерное нестационарное придонное течение политропного газа в восходящих закрученных потоках.

В представленной модели трехмерного течения политропного газа представлен анализ и исследование коэффициентов сходящихся рядов для газодинамических параметров различных классов по данным натурных наблюдений, которые повторяют природное явление. Кроме того, рассчитаны мгновенные линии тока для нестационарного случая трехмерного течения политропного газа.

### *Использованные источники:*

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – 399 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса. – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 181 с.
3. Казачинский А.О., Крутова И.Ю. Построение течений в придонной части восходящих закрученных потоков как решение одной характеристической задачи Коши : Препринт. – Снежинск : издательство СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – 60 с.

## ANALYTICAL MODELING OF NONSTATIONARY TORNADO-TYPE CURRENTS

A.O. Kazachinskij, I.Yu. Krutova

Snezhinsky Institute of Physics and Technology  
National Research Nuclear University "MEPhI",

456776, Snezhinsk, Chelyabinsk region, st. Komsomolskaya, 8, Snezhinsk, Russia,

[IYKrutova@mephi.ru](mailto:IYKrutova@mephi.ru)

An interesting phenomenon is quite common in nature - an ascending swirling stream of air. Examples of such streams are numerous tornadoes and tornadoes that are regularly observed in the southern United States and in other fairly warm and flat areas. Such phenomena include periodic tropical cyclones, as well as fire whirlwinds, often observed during the season of agricultural burns.

The relevance of the study is due to the fact that the study of ascending swirling flows not only makes it possible to reveal the mechanism of the emergence and functioning of these flows, but also leads to: 1) predicting the occurrence of tornadoes and cyclones; 2) recommendations on methods for the destruction of such natural streams; 3) to recommendations for the practical use of the energy of natural ascending swirling flows.

The report addresses issues related to the study of natural swirling updrafts such as tornadoes, tropical cyclones and fire whirlwinds. For the system of equations of gas dynamics taking into account the action of gravity and Coriolis forces, the existence and uniqueness of the solution of specific characteristic Cauchy problems of the standard form, modeling non-one-dimensional flows with a drain, an inflow, and near a heating cylinder, is substantiated. The fact of the absence of swirling is established if the rotation of the Earth around its axis is not taken into account in the initial initial-boundary value problem. Three-dimensional stationary flows of an ideal gas in the vicinity of an impenetrable horizontal plane under the action of gravity and Coriolis forces are approximately constructed by numerical methods, and their geometric, velocity and energy characteristics are determined.

#### **Literature:**

1. Bautin S.P., Krutova I.Yu., Obukhov A.G. Gas-dynamic theory of upward swirling flows. - Yekaterinburg: UrGUPS, 2020 .-- 399 p.
2. Bautin S.P., Krutova I.Yu. Analytical and numerical modeling of gas flows taking into account the action of the Coriolis force. - Yekaterinburg: UrGUPS, 2019 .-- 181 p.
3. Kazachinsky A.O., Krutova I.Yu. Construction of flows in the bottom part of ascending swirling flows as a solution to one characteristic Cauchy problem: Preprint. - Snezhinsk: publishing house SPTI NRNU MEPhI, 2016 .-- 60 p.

## ДВУМЕРНЫЕ ПЕРЕОДИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ УРАВНЕНИЯМИ ДВИЖЕНИЯ

Карелина О.А.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.,  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

[karelina-1999@inbox.ru](mailto:karelina-1999@inbox.ru)

В работе используется методика представлений решений системы нелинейных уравнений движения в виде бесконечных тригонометрических рядов от двух пространственных переменных. Коэффициенты рядов являются искомыми функциями от времени, для которых выписана бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений. При описании конкретных двумерных периодических течений, определяемых уравнениями движения, в начальный момент времени задаются данные в виде конечных линейных тригонометрических сумм. Решения поставленных задач Коши строятся в виде конечных отрезков тригонометрических рядов. Коэффициенты этих конечных сумм численно определяются при решении соответствующих задач Коши для конечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. При различных наборах начальных данных в работе построены соответствующие нестационарные двумерные периодические по пространственным переменным  $x$ ,  $y$  течения и проанализированы их свойства.

*Ключевые слова:* Полная система уравнений Навье-Стокса, система нелинейных уравнений движения, система обыкновенных дифференциальных уравнений, тригонометрические ряды.

## TWO-DIMENSIONAL INTERMITTENT FLOWS DEFINED BY THE EQUATIONS OF MOTION

Karelina O.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> MEPI National Nuclear Research University's Snezhinsk Physicotechnical Institute, Chelyabinsk Region

<sup>2</sup> Zababakhin RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk Region

[karelina-1999@inbox.ru](mailto:karelina-1999@inbox.ru)

In this paper we use the technique of representing solutions of the system of nonlinear equations of motion in the form of infinite trigonometric series from two spatial variables. The coefficients of the series are the sought functions from time, for which an infinite system of ordinary differential equations is written out. In describing specific two-dimensional periodic flows defined by the equations of motion, the data are given as finite linear trigonometric sums at the initial moment of time. Approximate solutions of the Cauchy problems are also constructed in the form of finite segments of trigonometric series. The coefficients of these finite sums are numerically determined by solving the corresponding Cauchy problems for finite systems of ordinary differential equations. For different sets of initial data, the corresponding unsteady two-dimensional periodic flows on spatial variables  $x$ ,  $y$  are constructed and their properties are analyzed.

*Keywords:* System of Navier-Stokes equations, nonlinear equation of motion, system of ordinary differential equations, trigonometric series.

### Введение.

В качестве математической модели для приближенной передачи движений газа далее из полной системы уравнений Навье-Стокса исследуются только уравнения движения в предположении постоянных значений термодинамических параметров плотности и температуры:  $\rho = 1, T = 1$ :

$$\mathbf{v}_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \mu_0 \left[ \frac{1}{4} \nabla(\operatorname{div} \mathbf{v}) + \frac{3}{4} \Delta \mathbf{v} \right]. \quad (1)$$

В системе (1) введены безразмерные переменные. При этом за масштаб скорости  $u_0$  взята величина  $\frac{1}{3} \cdot 10^3$  м/с, близкая к скорости звука в воздухе при нормальных условиях. За масштаб расстояния  $x_{00}$  берется величина, соответствующая геометрическим характеристикам конкретного исследуемого течения.

В данной работе рассматривается случай отсутствия зависимости от  $z$  и равенства нулю третьей компоненты вектора скорости газа:

$$\frac{\partial}{\partial z} = 0; v_3 = 0$$

и вводятся обозначения:  $u = v_1, v = v_2$ . В этом случае система (1) в подробной записи имеет следующий вид

$$\begin{cases} u_t + uu_x + vv_y = \mu_0 \left( u_{xx} + \frac{3}{4} u_{yy} + \frac{1}{4} u_{xy} \right), \\ v_t + uv_x + vv_y = \mu_0 \left( \frac{3}{4} v_{xx} + v_{yy} + \frac{1}{4} u_{xy} \right), \end{cases} \quad (2)$$

а третье уравнение системы (1) выполняется тождественно.

Далее о системе (2) и будет говориться как о системе уравнений движения.

В монографии [1] было предложено представлять одномерные решения полной системы уравнений Навье-Стокса в виде тригонометрических рядов.

В данной работе рассматривается случай двух пространственных переменных и с учетом результатов из работ [1-5] используются следующие представления искомым функций  $u, v$ :

$$\begin{aligned} u(t, x, y) = u_1(t, x) + u_2(t, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u_{m,2}(t) \sin(my), \\ v(t, x, y) = v_1(t, x) + v_2(t, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v_{m,2}(t) \sin(my). \end{aligned} \quad (3)$$

У искомым коэффициентов, зависящих от времени, стоят двойные индексы: первый индекс соответствует частоте гармоники, перед которой стоит этот коэффициент; второй индекс равен единице, если коэффициент стоит перед гармоникой, зависящей от пространственной переменной  $x$ , второй индекс равен двойке, если коэффициент стоит перед гармоникой, зависящей от пространственной переменной  $y$ .

Полученные представления (3) подставляются в систему (2), получается рассматриваемая далее система (4).

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{k=1}^{\infty} u'_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u'_{m,2}(t) \sin(my) = \\ & = - \left[ \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u_{m,2}(t) \sin(my) \right] \cdot \left[ \sum_{k=1}^{\infty} k u_{k,1}(t) \cos(kx) \right] - \\ & - \left[ \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v_{m,2}(t) \sin(my) \right] \cdot \left[ \sum_{m=1}^{\infty} m v_{m,2}(t) \cos(my) \right] + \\ & + \mu_0 \left[ - \sum_{k=1}^{\infty} k^2 u_{k,1}(t) \sin(kx) - \frac{3}{4} \sum_{m=1}^{\infty} m^2 u_{m,2}(t) \sin(my) \right], \\ & \sum_{k=1}^{\infty} v'_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v'_{m,2}(t) \sin(my) = \\ & = - \left[ \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u_{m,2}(t) \sin(my) \right] \cdot \left[ \sum_{k=1}^{\infty} k v_{k,1}(t) \cos(kx) \right] - \\ & - \left[ \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v_{m,2}(t) \sin(my) \right] \cdot \left[ \sum_{m=1}^{\infty} m v_{m,2}(t) \cos(my) \right] + \\ & + \mu_0 \left[ - \frac{3}{4} \sum_{k=1}^{\infty} k^2 v_{k,1}(t) \sin(kx) - \sum_{m=1}^{\infty} m^2 v_{m,2}(t) \sin(my) \right]. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

С уравнениями в системе (4) проводятся математические преобразования, а затем полученные уравнения проецируются сначала на базис

$$\{\sin(x), \sin(2x), \sin(3x), \dots\},$$

а затем на базис

$$\{\sin(y), \sin(2y), \sin(3y), \dots\}.$$

В результате получается бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов  $u_{k,1}(t)$ ,  $u_{k,2}(t)$ ,  $v_{k,1}(t)$ ,  $v_{k,2}(t)$

$$u'_{\ell,1} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M m u_{k,1}(t) u_{m,1}(t) b_{k\ell m} - \mu_0 \ell^2 u_{\ell,1}; \quad \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

$$v'_{\ell,1} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M m u_{k,1}(t) v_{m,1}(t) b_{k\ell m} - \frac{3}{4} \mu_0 \ell^2 v_{\ell,1}; \quad \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

$$u'_{\ell,2} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M k v_{m,2}(t) u_{k,2}(t) b_{k\ell m} - \frac{3}{4} \mu_0 \ell^2 u_{\ell,2}; \quad \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$v'_{\ell,2} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M k v_{k,2}(t) v_{m,2}(t) b_{k\ell m} - \mu_0 \ell^2 v_{\ell,2}; \quad \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

в которых символ  $M$  означает бесконечность в случае рассмотрения бесконечных тригонометрических рядов, а в случае конечных отрезков тригонометрических рядов полагается  $M = K$ .

Для получения единственных решений систем (5)-(8) задаются начальные условия

$$u_{k,1}(0) = u_{k,1}^0; \quad u_{k,2}(0) = u_{k,2}^0; \quad v_{k,1}(0) = v_{k,1}^0; \quad v_{k,2}(0) = v_{k,2}^0, \quad k = 1, 2, \dots$$

такие, что числовые ряды

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}^0; \quad \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,2}^0; \quad \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}^0; \quad \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,2}^0$$

сходятся абсолютно. Это соответствует тому, что для системы (4) заданы начальные условия

$$\begin{cases} u(t, x, y)|_{t=0} = \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}^0 \sin(kx) + \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,2}^0 \sin(ky), \\ v(t, x, y)|_{t=0} = \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}^0 \sin(kx) + \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,2}^0 \sin(ky). \end{cases} \quad (9)$$

Для детализации результатов расчетов вводится следующее обозначение сосчитанных вариантов. Название «*Вариант k-ℓ-m-n*» означает, что в начальных условиях для систем (5)-(8) ненулевые значения имеют только коэффициенты:

$$u_{k,1}(0) = u_{\ell,2}(0) = v_{m,1}(0) = v_{n,2}(0) = 0.1, \quad (10)$$

и у которых начальные значения для простоты последующего анализа все взяты равными одной десятой.

Далее при различных начальных данных в работе рассмотрены конкретные нестационарные двумерные периодические по пространственным переменным  $x, y$  течения газа и проанализированы их свойства.

#### Результаты расчета варианта 3-3-5-5

Число слагаемых в тригонометрических суммах взято  $K=300$ , начальные распределения искомым функций имеют следующий вид:

$$\begin{cases} u(0, x, y) = 0.1 \sin(3x) + 0.1 \sin(3y), \\ v(0, x, y) = 0.1 \sin(5x) + 0.1 \sin(5y). \end{cases} \quad (11)$$

На рисунке (Рисунок 1) приведены мгновенные линии тока в разные моменты времени.

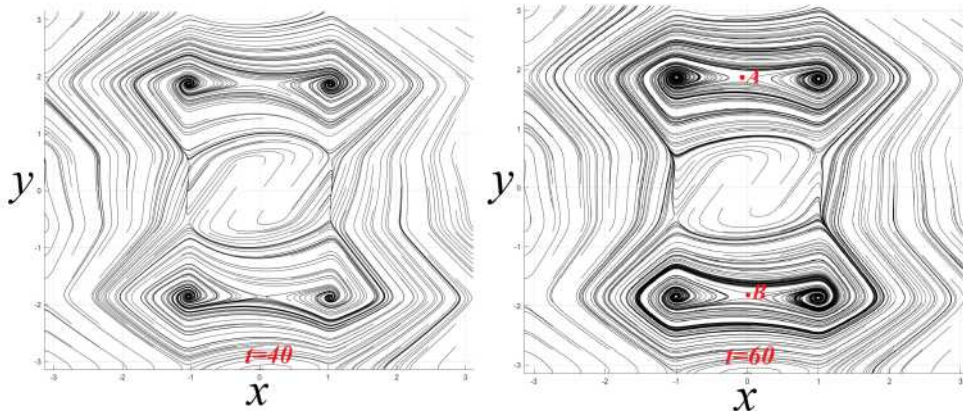


Рисунок 1 – Мгновенные линии тока при  $t=40$  и  $t=60$

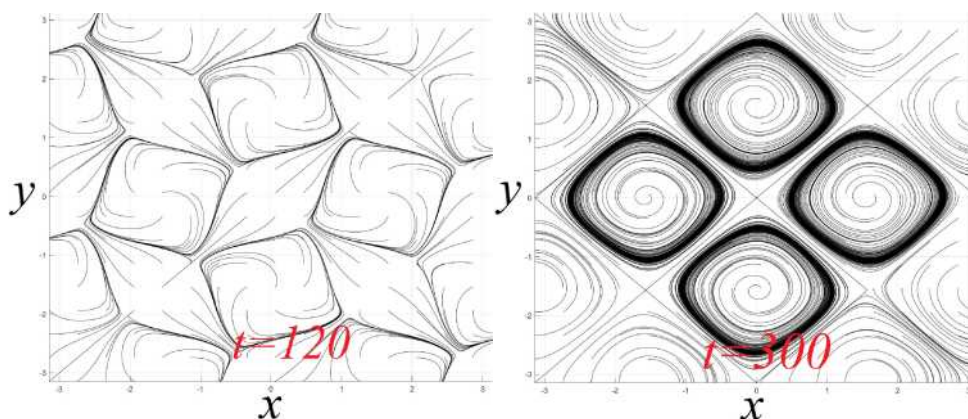
#### Результаты расчета варианта 4-2-2-4

Число слагаемых в тригонометрических суммах взято  $K=300$ , начальные распределения искомым функций имеют следующий вид:

$$\begin{cases} u(0, x, y) = 0.1 \sin(4x) + 0.1 \sin(2y), \\ v(0, x, y) = 0.1 \sin(2x) + 0.1 \sin(4y). \end{cases} \quad (12)$$

На рисунке (Рисунок 2) приведены мгновенные линии тока в разные моменты времени.



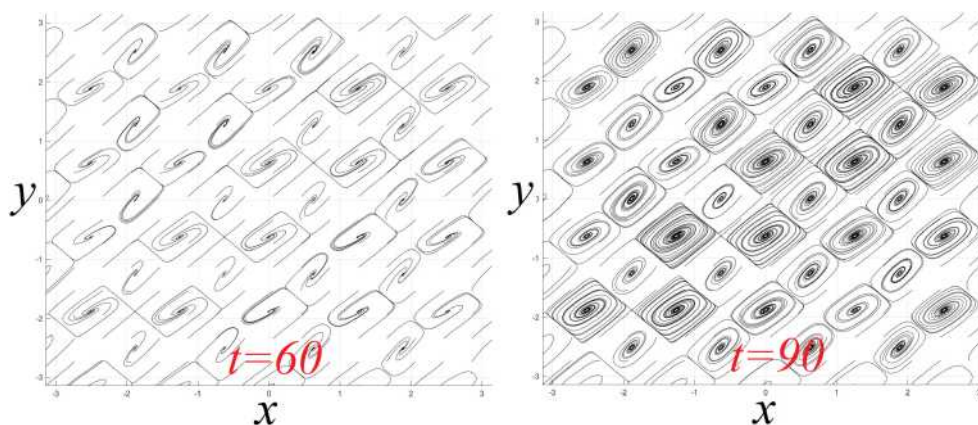
Рисунок 2 – Мгновенные линии тока при  $t=120$  и  $t=300$ 

### Результаты расчета варианта 5-5-5-5

Число слагаемых в тригонометрических суммах взято  $K=300$ , начальные распределения искомых функций имеют следующий вид:

$$\begin{cases} u(0, x, y) = 0.1 \sin(5x) + 0.1 \sin(5y), \\ v(0, x, y) = 0.1 \sin(5x) + 0.1 \sin(5y). \end{cases} \quad (13)$$

На рисунке (Рисунок 2) приведены мгновенные линии тока в разные моменты времени.

Рисунок 3 – Мгновенные линии тока при  $t=60$  и  $t=90$ 

Для большей наглядности результаты расчетов оформлены в отдельные фильмы.

#### Использованные источники:

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск: Наука, Екатеринбург: УрГУПС, 2014. - 91 с.
2. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Сходимости бесконечных тригонометрических рядов, решающих уравнение Бюргерса. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. - 34 с.
3. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргерса тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, том 11, № 4, с. 305-318.
4. Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. Нестационарные двумерные периодические решения уравнений движения. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. - 57 с.
5. Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. Представление решений системы уравнений движения с помощью тригонометрических рядов // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2023, том 12, № 1, с. 39-51.

## ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ПОТОКОВ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НАГРЕВА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кононов С.Н.

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*

[kononovsn@susu.ru](mailto:kononovsn@susu.ru)

Аннотация. Представлена визуализация начальных течений воздуха при нагреве подстилающей поверхности в цилиндрических координатах. Предложены варианты проверки адекватности расчётной модели физическим процессам.

*Ключевые слова: полная система уравнений Навье-Стокса, явная разностная схема, визуализация газодинамических параметров*

## CHECKING THE ADEQUACY OF AIR FLOWS IN NUMERICAL SIMULATION OF HEATING OF THE UNDERLYING SURFACE

Kononov S.N.

*Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI,  
Chelyabinsk region*

[kononovsn@susu.ru](mailto:kononovsn@susu.ru)

Abstract. The visualization of the initial air flows during heating of the underlying surface in cylindrical coordinates is presented. Options for verifying the adequacy of the computational model to physical processes are proposed.

*Keywords: complete system of Navier-Stokes equations, explicit difference scheme, visualization of gas dynamic parameters*

В [1] была поставлена нестационарная задача численного моделирования потоков воздуха при наличии пятна подогрева на подстилающей поверхности. В цилиндрических координатах модель вязкого теплопроводного газа в поле действия силы тяжести и с учётом силы Кориолиса рассмотрена в [2]. Для визуального представления расчётных параметров газа результаты переносятся в пакет визуализации ParaView [3]. Проверка схемы из [2] проводилась для известного точного решения стационарного режима. Наличие пятна подогрева на подстилающей поверхности приведёт к возникновению течений газа. Необходимо убедиться, что течения, полученные расчётом в модели, имеют подтверждения в физическом эксперименте.

При нагреве подстилающей поверхности должны наблюдаться следующие эффекты:

формирование вертикального восходящего потока над пятном за счёт расширения нагреваемого теплопередачей воздуха;

формирование нисходящего потока за пределами пятна нагрева за счёт охлаждения воздуха в поднимающемся потоке;

появление в приповерхностных слоях воздуха потоков в сторону пятна вблизи его границ.

На рисунке 1 представлено изменение температуры воздуха над пятном нагрева. Видно постепенное проникновение тёплого воздуха вверх.

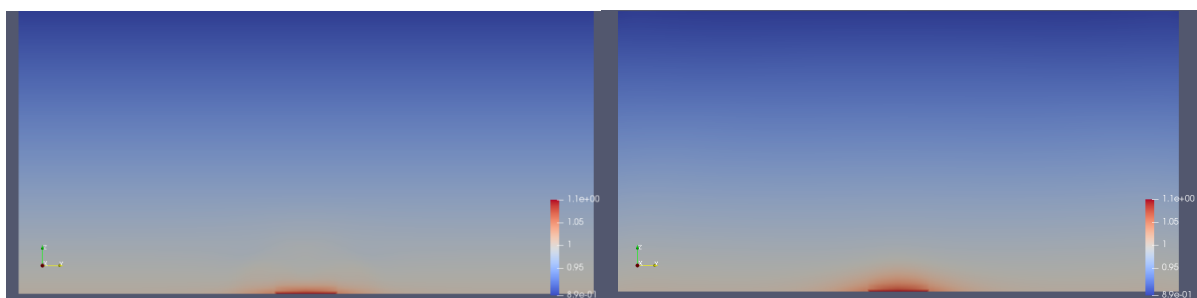


Рисунок 1. Вертикальный срез распределения температуры по высоте через 3 секунды нагрева (слева) и через 24 секунды (справа).

Линии тока на рисунке 2 демонстрируют подъём тёплого воздуха над пятном, остывание и последующее опускание за пределами пятна нагрева.

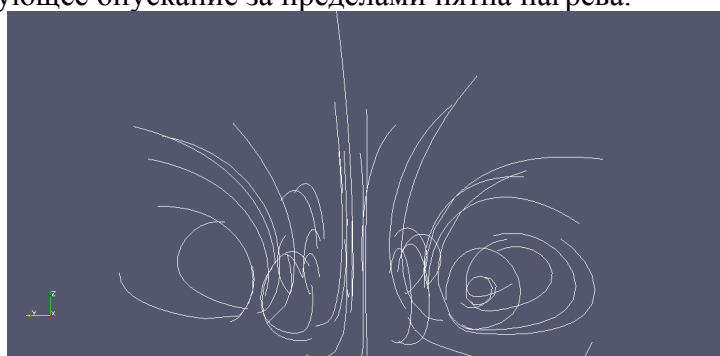


Рисунок 2. Линии тока через 24 секунды нагрева. Вверх и в стороны, некоторые возвращаются к поверхности.

Горизонтальный срез на рисунке 3 показывает формирование потоков воздуха в направлении от границ модели к границе пятна нагрева.



Рисунок 3. Горизонтальный срез радиальной скорости через 24 секунды нагрева на высоте 0.1.

В целом можно считать расчётное поведение газа схожим с экспериментальными потоками.

#### *Использованные источники:*

1. Баутин С. П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков Екатеринбург: УрГУПС, 2020.
2. Баутин С.П. Кононов С.Н. Левунина Э.С. Численное моделирование течений в восходящих закрученных потоках с использованием разностной схемы. Математические структуры и моделирование. № 3 (63). Омск, 2022.
3. Левунина Э.С., Кононов С.Н. Визуализация расчётных параметров газа в цилиндрических координатах при организации продува вверх. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Санкт-Петербург, 21-25 августа 2023 г.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА

Крутова И.Ю.

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*

[IYKrutova@mephi.ru](mailto:IYKrutova@mephi.ru)

В природе довольно часто встречается интересное явление – восходящий закрученный поток воздуха. В качестве примеров таких потоков можно привести многочисленные смерчи и торнадо, регулярно наблюдаемые на юге США и в других достаточно теплых и ровных местностях. К подобным явлениям относятся и периодически возникающие тропические циклоны, а также огненные вихри, часто наблюдаемые в сезон сельскохозяйственных палов.

Актуальность исследования обусловлена тем, что изучение восходящих закрученных потоков не только позволяет раскрыть механизм возникновения и функционирования этих потоков, а также приводит: 1) к прогнозу возникновения торнадо и циклонов; 2) к рекомендациям по способам уничтожения подобных природных потоков; 3) к рекомендациям по практическому использованию энергии природных восходящих закрученных потоков.

В докладе рассмотрены вопросы, связанные с исследованием природных восходящих закрученных потоков, таких как торнадо, тропические циклоны и огненные вихри. Для системы уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса обосновано существование и единственность решения конкретных характеристических задач Коши стандартного вида, моделирующих не одномерные течения со стоком, притоком и возле нагревающегося цилиндра. Установлен факт отсутствия закрутки, если в исходной начально-краевой задаче не учитывается вращение Земли вокруг своей оси. Численными методами приближенно построены трехмерные стационарные течения идеального газа в окрестности непроницаемой горизонтальной плоскости в условиях действия сил тяжести и Кориолиса и определены их геометрические, скоростные и энергетические характеристики.

### *Использованные источники:*

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – 399 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса. – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 181 с.
3. Казачинский А.О., Крутова И.Ю. Построение течений в придонной части восходящих закрученных потоков как решение одной характеристической задачи Коши : Препринт. – Снежинск : издательство СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – 60 с.
4. Крутова И.Ю., Опышко О.В. Расчет кинетической энергии течений в придонной части торнадо и тропического циклона : Препринт. – Снежинск : издательство СФТИ НИЯУ МИФИ, 2018. – 45 с.

## ANALYTICAL AND NUMERICAL MODELING TORNADO-TYPE CURRENTS WHEN CONSIDERING THE ACTION GRAVITY AND CORIOLIS FORCES

Krutova I.Yu.

Snezhinsky Institute of Physics and Technology  
National Research Nuclear University "MEPhI",

456776, Snezhinsk, Chelyabinsk region, st. Komsomolskaya, 8, Snezhinsk, Russia,

An interesting phenomenon is quite common in nature - an ascending swirling stream of air. Examples of such streams are numerous tornadoes and tornadoes that are regularly observed in the southern United States and in other fairly warm and flat areas. Such phenomena include periodic tropical cyclones, as well as fire whirlwinds, often observed during the season of agricultural burns.

The relevance of the study is due to the fact that the study of ascending swirling flows not only makes it possible to reveal the mechanism of the emergence and functioning of these flows, but also leads to: 1) predicting the occurrence of tornadoes and cyclones; 2) recommendations on methods for the destruction of such natural streams; 3) to recommendations for the practical use of the energy of natural ascending swirling flows.

The report addresses issues related to the study of natural swirling updrafts such as tornadoes, tropical cyclones and fire whirlwinds. For the system of equations of gas dynamics taking into account the action of gravity and Coriolis forces, the existence and uniqueness of the solution of specific characteristic Cauchy problems of the standard form, modeling non-one-dimensional flows with a drain, an inflow, and near a heating cylinder, is substantiated. The fact of the absence of swirling is established if the rotation of the Earth around its axis is not taken into account in the initial initial-boundary value problem. Three-dimensional stationary flows of an ideal gas in the vicinity of an impenetrable horizontal plane under the action of gravity and Coriolis forces are approximately constructed by numerical methods, and their geometric, velocity and energy characteristics are determined.

#### **Literature:**

1. Bautin S.P., Krutova I.Yu., Obukhov A.G. Gas-dynamic theory of upward swirling flows. - Yekaterinburg: UrGUPS, 2020 .-- 399 p.
2. Bautin S.P., Krutova I.Yu. Analytical and numerical modeling of gas flows taking into account the action of the Coriolis force. - Yekaterinburg: UrGUPS, 2019 .-- 181 p.
3. Kazachinsky A.O., Krutova I.Yu. Construction of flows in the bottom part of ascending swirling flows as a solution to one characteristic Cauchy problem: Preprint. - Snezhinsk: publishing house SPTI NRNU MEPhI, 2016 .-- 60 p.
4. Krutova I.Yu., Opryshko OV. Calculation of the kinetic energy of currents in the bottom part of a tornado and a tropical cyclone: Preprint. - Snezhinsk: publishing house SPTI NRNU MEPhI, 2018 .-- 45 p.



## МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ХОДЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Латыпов А.А.<sup>1,2</sup>, Лебедев С.Н.<sup>1,2</sup>, Овечкин А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

Аннотация. Была разработана с учётом мирового опыта математическая модель рефракции, отражения и поглощения лазерного излучения, которая будет применена для решения задач прогнозирования поведения перемешивания и абляции на поверхности термоядерной мишени, а также изучения течений излучающей газоплазменной среды переменного ионизационного состава с частичным выходом излучения.

Была проведена проверка работоспособности элемента модели, касающегося расчёта поглощения энергий в области закритической плотности. Было показано качественное соответствие с аналитическим решением в случае задачи на конечной области при однородном профиле диэлектрической проницаемости.

*Ключевые слова:* Математическое моделирование, инерциальный термоядерный синтез, поглощение лазерного излучения, критическая плотность.

## LASER RADIATION ABSORPTION MODEL FOR NUMERICAL SIMULATION OF PROCESSES OCCURRING IN THE COURSE OF INERTIAL CONFINEMENT FUSION

Latypov A.A.<sup>1,2</sup>, Lebedev S.N.<sup>1,2</sup>, Ovechkin A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zababakhin RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk Region.

<sup>2</sup> MEPI National Nuclear Research University's Snezhinsk Physicotechnical Institute, Chelyabinsk Region

Abstract. Mathematical model of refraction, reflection and absorption of laser radiation was developed based on previous scientific experience. This model will be used in for computing problems of behavior prognosis of ablation and mixing on surface of thermonuclear target and also in research of radiating flows of gas-plasma medium of alternating ionizing composition with partial radiation yield.

Performance conformation of model element for computation of absorption in region of critical density was carry out. Analytic correspondence was shown in case of the problem with finite range with homogeneous profile of dielectric permittivity.

*Keywords:* Mathematical modeling, inertial confinement fusion, absorption of laser radiation, critical density.

### Введение

Увеличение доли применения лазеров в крупных научных исследованиях и проектах требует компьютерного моделирования. Необходимость в последнем возникает не только как средство верификации натуральных экспериментов, но и как цифровой двойник опытных и производственных установок. В частности, возникает потребность в математическом моделировании процессов, возникающих в ходе взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с веществом. Примером явлений, которые моделируются, является управляемый термоядерный синтез. Инерциальный управляемый термоядерный синтез (или ИТС) – разновидность термоядерного синтеза, особенность которой в удержании топлива за счёт



собственных сил инерции, проявляющихся в результате процессов взаимодействия лазерного или вторичного излучения с веществом [1].

На момент написания данной работы уже известны различные модели поглощения лазерного излучения (ЛИ) как зарубежного [2], так и отечественного происхождения [3]. В ходе их изучения предлагается некоторая обобщенная модель, работоспособность которой будет проверена путём расчёта пробной задачи на основе задачи полубесконечного слоя однородного вещества. Модель, после успешной проверки, может быть применена для решения задач, касаемо прогнозирования поведения перемешивания и абляции на поверхности термоядерной мишени, а также изучения течений излучающей газоплазменной среды переменного ионизационного состава с частичным выходом излучения.

Рассмотрение данных исследуемых случаев остаётся актуальным ввиду того, что на понимании этих процессов основывается: оптимальное построение мишеней, подбор её состава и геометрических размеров, что позволят достигнуть контроля над ИТС;

В данной статье демонстрируется математическая модель рефракции, отражения и поглощения ЛИ на основе существующих разработок. Результат планируется применить для исследований поведения мишеней под воздействием лазерного излучения и возникающего жёсткого рентгеновского излучения.

## 1. Модель поведения лучей лазерного излучения

### 1.1 Модель среды

Для расчётов параметров среды, применяется модель квазинейтральной плазмы, по которой для вычисления плотности электронов используется формула

$$n_e = \langle Z \rangle n_i = \rho \cdot \frac{\langle Z \rangle N_A}{A} = \frac{\langle Z \rangle \rho_{\text{плазмы}}}{m_0} = \frac{\langle Z \rangle \rho_{\text{плазмы}}}{1.66 \cdot 10^{-24} \cdot \langle A \rangle} \quad (1.1)$$

где –  $N_A$  число Авогадро,  $A$  – молярная масса.

Вычисление плотности электронов требует определение среднего заряда иона в точке, частоты электрон-ионных столкновений и кулоновского логарифма, которые будут получены неявно, по табличным данным[4].

Помимо вышеперечисленных значений, в ячейке должны быть известны градиент плотности электронов  $\langle \nabla n_e \rangle$  и показатель преломления

$$\langle \eta \rangle = \sqrt{1 - \frac{\langle n_e \rangle}{n_{cr}}},$$

где  $n_{cr}$  - критическая плотность

$$n_{cr} = \frac{m_e \pi c^2}{\lambda^2 e^2},$$

$\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

Диэлектрическая проницаемость, необходимая для счёта в области за критической плотности, в ячейках будет определена в рамках модели Друде по формулам:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2,$$

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\varpi}{1 + \nu}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\varpi \sqrt{\nu}}{1 + \nu},$$

$$\nu = \frac{\nu_{ie}^2}{\omega^2}, \quad \varpi = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}.$$

Здесь  $\omega$  – круговая частота лазерного излучения,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\nu_{ie}$  – частота электрон-ионных столкновений,  $\omega_{pe}^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m_e}$

плазменная частота,  $\omega^2 = \frac{4\pi n_{cr} e^2}{m_e}$  – критическая частота,  $e$  – элементарный заряд,  $m_e$  – масса электрона,  $n_e$  – плотность свободных электронов,  $n_{cr}$  – критическая плотность.

В связи с таким подходом, показатель преломления можно также определить, как комплексный в виде

$$\langle \eta \rangle = n_1 + in_2,$$

$$n_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}},$$

$$n_2 = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}}.$$

## 1.2 Трассировка лучей в приближении геометрической оптики

Прежде чем вести речь о трассировке ЛИ, ведём лазерный луч как объект и его предполагаемые особенности перед входом в систему.

Лазерный луч представляет собой часть лазерного пучка – набора лучей в виде трубки, направленную вдоль оси. Его форма и вид, а также параметры задаются внутри программного комплекса. Мощность, как и интенсивность, среди таких лучей может быть распределена:

- равномерно,
- по гауссовому распределению,
- по супергауссовому распределению.

Данные лучи будут аппроксимированы в плоскости RZ линиями, каждая из которых будет нести долю мощности согласно выбранному распределению. До входа в тело и в момент входа включительно лучи не испытывают преломления.

При попадании внутрь тела и прохождении по ячейкам сетки лучи ЛИ имеют параболическую траекторию, определяемую градиентом плотности электронов. На границах ячеек возможно преломление и отражение луча.

Градиент плотности электронов будет вычислен по одной из аппроксимационных формул по плотностям и геометрии ячеек, окружающих рассматриваемую ячейку. Приведем вывод этих формул.

По теореме о градиенте имеем

$$\int (\nabla f) dS = \int f d\vec{n}$$

Полагая по теореме о среднем, что  $\int (\nabla f) dS \approx (\nabla f) \int dS$ , получаем

$$\nabla f = \frac{1}{S} \int (f) d\vec{n}.$$

Дальнейший расчёт ведётся так, что путь по области интегрирования ведётся против часовой стрелки,  $S$  – площадь области.

Для четырехугольной ячейки сетки предполагаем постоянство функции на ребрах. Тогда имеем

$$\nabla_h f = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^4 f_{i+\frac{1}{2}} \cdot \left( (\vec{n}_R)_{i+\frac{1}{2}}, (\vec{n}_Z)_{i+\frac{1}{2}} \right),$$

где  $f_{i+\frac{1}{2}}$  – значение функции на ребре,  $\vec{n}_{i+\frac{1}{2}}$  – внешняя нормаль к ребру ячейки.

Учитывая, что ребра являются отрезками прямых, получаем

$$\nabla_h f = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^4 f_{i+\frac{1}{2}} \cdot \left( -(Z_{i+1} - Z_i), (R_{i+1} - R_i) \right),$$

где  $R_i, Z_i$  – координаты узлов сетки.

Определение значения функции  $f_{i+\frac{1}{2}}$  на ребре будет посчитано по смежным к ребру ячейкам. Будем рассматривать шаблон, который состоит из ячейки и четырех ячеек ее окружающих (рис. 1).

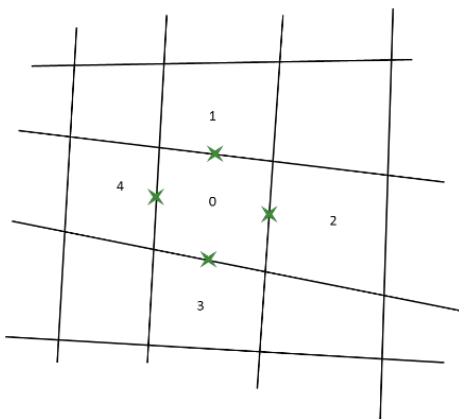


Рисунок 1 – Шаблон для градиента

В этом случае значения на ребрах определяются как полусумма значений функций из ячеек, смежных к ребру.

$$\begin{aligned}
 f_{i+\frac{1}{2},j} &= \frac{1}{2} \left( f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( f_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i+\frac{1}{2},j+1} &= \frac{1}{2} \left( f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{3}{2}} \right), \\
 f_{i+1,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2}} \right).
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Если какое-либо ребро выходит на границу области, значение функции на этом ребре полагается равным значению в центре ячейки.

В дальнейшем формулы (1.1) можно уточнять, записав их с весами

$$\begin{aligned}
 f_{i+\frac{1}{2},j} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i+\frac{1}{2},j} f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i+\frac{1}{2},j} \right) f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i,j+\frac{1}{2}} f_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i,j+\frac{1}{2}} \right) f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i+\frac{1}{2},j+1} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i+\frac{1}{2},j+1} f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i+\frac{1}{2},j+1} \right) f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{3}{2}} \right), \\
 f_{i+1,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i+1,j+\frac{1}{2}} f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i+1,j+\frac{1}{2}} \right) f_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2}} \right).
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

Веса можно взять по расстояниям (рис. 2).

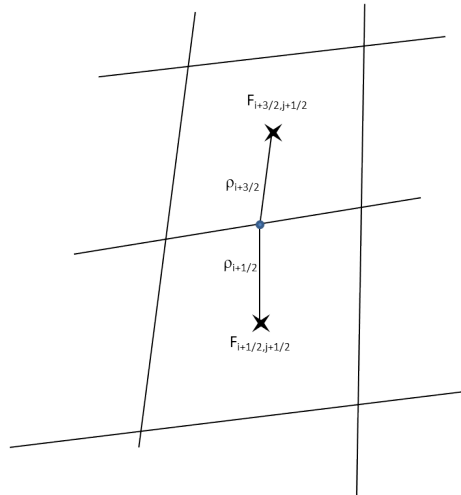


Рисунок 2 – Вычисление весов

После получения градиента плотности электронов для каждой ячейки, в которую входит луч, решаются четыре квадратных уравнения вида

$$A\tau^2 + B\tau + C = 0, \quad (1.4)$$

$$A = -\frac{c^2}{4n_{cr}} \left[ \langle \nabla n_e \rangle \times \vec{l}_i \right], B = \langle \eta \rangle c \cdot \left[ \vec{s}_0 \times \vec{l}_i \right], C = \left[ (\vec{r}_0 - \vec{r}_i) \times \vec{l}_i \right]$$

для определения, с каким ребром пересекается парабола. Здесь  $\vec{l}_i$  – вектор, касательный к ребру ячейки,  $\vec{r}_i$  – координата  $i$ -ого узла ребра ячейки,  $\vec{r}_0$  – координата на входном ребре,  $\vec{s}_0$  – направление луча.

Решением нашей задачи является минимальный положительный действительный корень этих уравнений. Он определяет выходную точку

$$\vec{r}_1 = -\frac{c^2}{2n_{cr}} \langle \nabla n_e \rangle \cdot \frac{\tau^2}{2} + \vec{s}_0 \cdot c \langle \eta \rangle \tau + \vec{r}_0$$

и следующую возможную ячейку. Это позволяет начать расчёт траектории луча внутри ячейки. Также в ней должны быть известны плотность электронов  $\langle n_e \rangle$ , её градиент  $\langle \nabla n_e \rangle$  и показатель преломления.

Для обеспечения корректной работы модели выводится специальный критерий, определяющий момент перехода от приближения геометрической оптики к волновой, то есть в момент приближения значения плотности электронов к значению критической плотности.

$$\langle n_e \rangle_2 + \beta \cdot \lambda \left| \langle \nabla n_e \rangle_2 \right| > \alpha n_{cr}, \quad (1.5)$$

где  $\alpha \approx 0.8, \beta \approx 1$ .

При отражении для определения входных параметров ячейки, в которую отразился луч, используются

$$\vec{r}_0 = \vec{r}_1, \vec{s}_0 = \vec{s}_1 - 2\vec{n}_1 \cdot (\vec{s}_1 \cdot \vec{n}_1),$$

$\vec{n}_1$  – нормаль к ребру, на котором лежит точка  $\vec{r}_1$ .

Луч может также отразиться от оси системы.

Если луч проходит в следующую ячейку, определяется угол поворота. Для этого вычисляется скорость

$$\begin{aligned}\vec{V}_2 &= \alpha \vec{n}_1 + \beta \vec{l}_1, \\ \alpha &= c \langle n_1 \rangle \sqrt{(\vec{s}_1 \cdot \vec{n}_1)^2 + \left(\frac{\langle n_2 \rangle}{\langle n_1 \rangle}\right)^2} - 1, \\ \beta &= c \langle n_1 \rangle (\vec{s}_1 \cdot \vec{l}_1), \\ \vec{l}_1 \cdot \vec{n}_1 &= 0.\end{aligned}$$

Причём должно выполняться условие

$$\sqrt{(\vec{s}_1 \cdot \vec{n}_1)^2 + \left(\frac{\langle n_2 \rangle}{\langle n_1 \rangle}\right)^2} - 1 > 0.$$

По скорости определяется вектор входного направления луча  $\vec{s}_0$  в следующей ячейке

$$\vec{s}_0 = \frac{\vec{V}_2}{|\vec{V}_2|}$$

и входная координата  $\vec{r}_0 = \vec{r}_1$ .

Луч заканчивает свое существование, если он вышел из системы через внешнюю границу или мощность (относительная), которую он несет, стала меньше некоторого  $\varepsilon \approx 10^{-8}$ .

### 1.3 Поглощение энергии лазерного излучения

Луч, двигаясь в ячейке по параболе, будет терять часть мощности. Эта потеря остается в ячейке в виде поглощенной веществом энергии.

Для определения вклада энергии потребуется определить коэффициент поглощения[5]

$$\begin{aligned}\kappa &= \frac{2\omega}{c} n_2, \\ n_2 &= \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}}.\end{aligned}\tag{1.6}$$

Здесь  $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$  – частота лазерного излучения.

Изменение мощности луча вдоль траектории определяется уравнением

$$\frac{dP}{ds} = -\kappa n_1 P,$$

где  $s = ct, n_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}}$ .

Интегрируя после замены переменных, получаем

$$P(t) = P(0) \cdot e^{-c \int_0^t \kappa n_1 dt}\tag{1.7}$$

Используется представление функций внутри ячейки в виде

$$\begin{aligned}n_e &= \langle n_e \rangle + \langle \nabla n_e \rangle (\vec{r} - \langle \vec{r} \rangle), \\ T_e &= \langle T_e \rangle + \langle \nabla T_e \rangle (\vec{r} - \langle \vec{r} \rangle).\end{aligned}\tag{1.8}$$

Здесь  $\langle \vec{r} \rangle$  – координаты центра ячейки.

Представим в таком же виде подынтегральное выражение из (1.7):

$$c\kappa n_1 = \langle c\kappa n_1 \rangle + \langle \nabla (c\kappa n_1) \rangle (\vec{r} - \langle \vec{r} \rangle)\tag{1.9}$$

Подставим в формулу (1.9) траекторию луча в ячейке

$$ckn_1 = \langle ckn_1 \rangle + \langle \nabla(ckn_1) \rangle \left( -\frac{c^2}{2n_{cr}} \langle \nabla n_e \rangle \cdot \frac{t^2}{2} + \vec{s}_0 \cdot c \langle \eta \rangle t + \vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle \right)$$

и проинтегрируем это выражение. Получим

$$P_1 = P_0 \cdot e^{A\tau^3 + B\tau^2 + C\tau},$$

где

$$\begin{aligned} A &= -\frac{c^2}{12n_{cr}} \left( \langle \nabla(ckn_1) \rangle \right), \\ B &= \frac{1}{2} c \langle \eta \rangle \left( \vec{s}_0 \cdot \langle \nabla(ckn_1) \rangle \right), \\ C &= \langle ckn_1 \rangle + \left( (\vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle) \cdot \langle \nabla(ckn_1) \rangle \right). \end{aligned} \quad (1.10)$$

С точностью до преобразований последний коэффициент можно также представить в виде

$$C = (ckn_1)_0 \quad (1.11)$$

При этом величину  $(ckn_1)_0$  следует вычислить по температуре и плотности в точке  $\vec{r}_0$ , которые вычисляются через разложения

$$\begin{aligned} (n_e)_0 &= \langle n_e \rangle + \langle \nabla n_e \rangle (\vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle), \\ (T_e)_0 &= \langle T_e \rangle + \langle \nabla T_e \rangle (\vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle). \end{aligned} \quad (1.12)$$

#### 1.4 Определение долей лазерного излучения на границе области закритической плотности

Вычисления в закритической области проводятся для определения доли отраженной энергии и для распределения поглощенной энергии в этой области.

Для описания данного элемента модели воспользуемся представлением, применяемым в ПП RALEF-2D.

Есть точка  $\vec{r}_1$ , в которой были выполнены условия отражения. Из этой точки в закритической области строится равномерная сетка вдоль оси. Для этого считается глубина закритической области – скин-слой.

Толщина скин-слоя определяется выражением

$$\lambda_{ck} = \frac{2}{\kappa(\omega)}, \quad (1.13)$$

где  $\kappa(\omega)$  – коэффициент обратно-тормозного поглощения.

Разбиение рассчитанной глубины скин-слоя на N равномерных ячеек на интервале  $[X_0^1, X_N^1]$ , где  $X^1$ - координаты, вдоль оси, направленные вдоль градиента плотности электронов. При разбиении в ячейки в них заносятся значения комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_\omega(X^1) \rightarrow \varepsilon_j$  и при этом должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\omega(X^1 < X_0^1) &= \varepsilon_0 = n_0^2; \\ \varepsilon_\omega(X^1 > X_N^1) &= \varepsilon_{N+1} = \varepsilon_\infty = n_\infty^2; \\ \text{Im}(\varepsilon_0) &= \text{Im}(\varepsilon_\infty) = 0; \\ \varepsilon_0 &> 0; \end{aligned} \quad (1.14)$$

Размер разбиваемой области может быть меньше скин-слоя, поскольку возможен случай, когда в последних ячейках плотность электронов превышает критическую, достигает



локального максимума (вдоль направления луча), или когда луч доходит до границы счётной области.

Сетка на выбранном интервале будет строиться по узлам, которые находятся как точки пересечения луча, направленного вдоль градиента электронной плотности в точке  $\vec{r}_i$ , с рёбрами ячеек двумерной сетки. Размер ячеек будет зависеть от размерности системы. В случае попадания ячеек новой сетки на границу старых, то значение диэлектрической проницаемости в ней будет определено как среднее значение меж величин из двух ячеек.

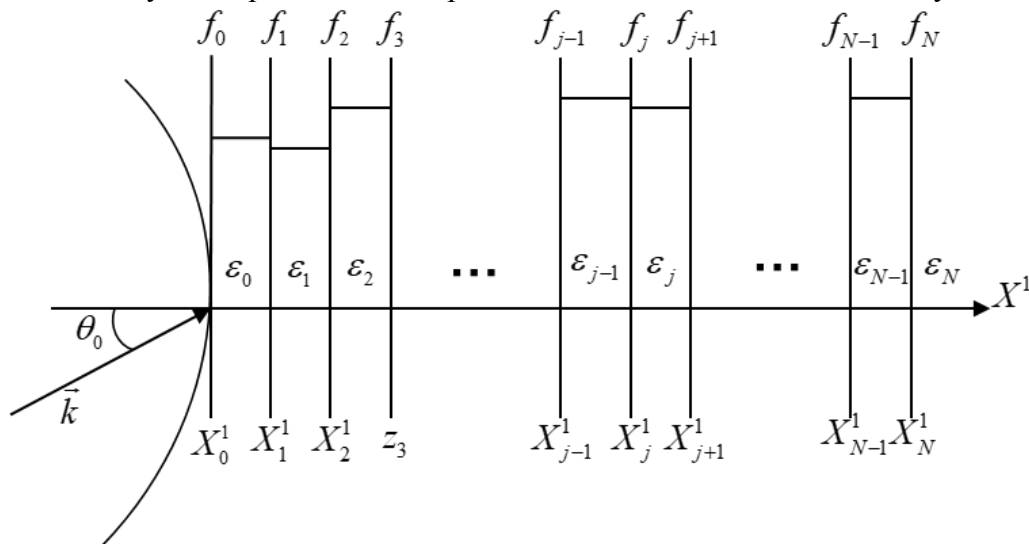


Рисунок 3 - Разбиение слоями закритической области

Во всех дальнейших формулах под  $X^1$  понимаются безразмерные координаты:

$$X^1 = \frac{\omega}{c} z' = \frac{2\pi z'}{\lambda}$$

где  $z'$  – реальная координата.

Далее идет выбор режима поляризации лазера, то есть выбор s- или p-поляризации лазерного излучения исходя из начальных данных задачи. Выбор влияет на дальнейшие вычисления.

Как параметр модели, выбрана круговая поляризация. Её учёт поляризации ведётся следующим образом: в момент расчёта луча в закритической области, он делится пополам, и выделяемая ими мощность подсчитывается независимо друг от друга как две независимые составляющие. Отражённая часть суммируется и отправляется в систему в одном луче.

Далее приведена последовательность вычислений, касающихся определения коэффициентов, отвечающих за доли поглощённой и отражённой составляющих мощности лазерного луча.

1. Расчёт  $k_j$  и  $\Phi_j$ :

$$\begin{aligned} k_j &= k_j' + ik_j'' = \sqrt{\varepsilon_j - n_0^2 \sin^2(\theta_0)}, \\ \Phi_j &= k_j (X_j^1 - X_{j-1}^1); \\ \Phi_0 &= 0; j = 0, 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (1.15)$$

2. Расчёт  $G_j$ ,  $H_j$  и  $\gamma_j$ :

$$\begin{aligned}
 H_j &= G_j \cdot G_{j-1} \cdot \dots \cdot G_0; \\
 G_j &= 0.5 \begin{pmatrix} (1 + \gamma_j) \exp(i\Phi_j) & (1 - \gamma_j) \exp(-i\Phi_j) \\ (1 - \gamma_j) \exp(i\Phi_j) & (1 + \gamma_j) \exp(-i\Phi_j) \end{pmatrix}; \\
 \gamma_j &= \begin{cases} \frac{k_j}{k_{j+1}}, s\text{-пол.} \\ \frac{\varepsilon_{j+1} k_j}{k_{j+1} \varepsilon_j}, p\text{-пол.} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

Ввиду присутствия увеличивающихся и уменьшающихся экспонент, их постоянное перемножение может вызвать накопление арифметической ошибки. Для её исключения ведется расчёт  $\tilde{G}_j$  и  $\tilde{H}_j$ :

$$\begin{aligned}
 \tilde{H}_j &= \tilde{G}_j \cdot \tilde{G}_{j-1} \cdot \dots \cdot \tilde{G}_0; \\
 \tilde{G}_j &= \exp(-\sigma_j) G_j; \\
 \sigma_j &= k_j^* (X_j^1 - X_{j-1}^1) \geq 0; j = 1, \dots, N; \\
 \sigma_0 &= 0;
 \end{aligned} \tag{1.17}$$

3. Расчёт  $r, p, C_j^+, C_j^-$ :

Далее ведётся расчёт амплитуды отражения  $r$

$$r = \frac{-\tilde{H}_{N,21}}{\tilde{H}_{N,22}}, \tag{1.18}$$

где 21 и 22 это номера столбца и строки в матрице  $\tilde{H}_N$ , расчёт амплитуды прохождения  $p$ :

$$p = \frac{\exp\left(-\sum_{j=1}^N \sigma_j\right) \cdot \left(\prod_{j=0}^N \gamma_j\right)}{\tilde{H}_{N,22}}, \tag{1.19}$$

расчёт амплитуд  $C_j^+, C_j^-$ :

$$\vec{C}_{j+1} = \begin{pmatrix} C_{j+1}^+ \\ C_{j+1}^- \end{pmatrix} = \tilde{G}_j \vec{C}_j = \tilde{G}_j \begin{pmatrix} C_j^+ \\ C_j^- \end{pmatrix} = e^{\sum_{i=1}^j \sigma_i} \tilde{H}_j \vec{C}_0. \tag{1.20}$$

Стоит упомянуть и возникающие граничные условия:

$$\begin{aligned}
 C_0^+ &= 1, \\
 C_0^- &= \frac{-\tilde{H}_{N,21}}{\tilde{H}_{N,22}}, \\
 C_{N+1}^+ &= \frac{\exp\left(-\sum_{j=1}^N \sigma_j\right) \cdot \left(\prod_{j=0}^N \gamma_j\right)}{\tilde{H}_{N,22}}, \\
 C_{N+1}^- &= 0.
 \end{aligned} \tag{1.21}$$

4. Расчёт коэффициентов отражённой, поглощённой и переданной энергий ЛИ: Коэффициент отражённой энергии ЛИ рассчитывается как

$$R_{rfl} = \left| \frac{C_0^-}{C_0^+} \right|^2 = |r|^2. \quad (1.22)$$

Коэффициент энергии ЛИ, вышедшей за область расчёта:

$$R_{rr} = \frac{|p|^2}{\cos \theta_0} \cdot \begin{cases} \frac{\operatorname{Re}(k_{N+1})}{n_0}, s - \text{пол.} \\ n_0 \cdot \operatorname{Re} \left( \frac{k_{N+1}}{\varepsilon_{N+1}} \right), p - \text{пол.} \end{cases} \quad (1.23)$$

Балансировка энергии для луча достигается следующим образом: считается, что луч, приходящий на ячейку с критической областью, делится на отражённый с мощностью, равной входящей в ячейку, умноженной на коэффициент отражения (1.22). Оставшаяся энергия разделяется на поглощённую и вышедшую за пределы системы (1.23). Коэффициенты поглощения рассчитываются для каждой ячейки скин-слоя как

$$R_{abs_j} = R_{abs,sec_j} + R_{abs,osc_j},$$

$$R_{abs,sec_j} = \left[ |C_j^+|^2 \left( 1 - e^{-2\operatorname{Im}(k_j)(X_j^1 - X_{j-1}^1)} \right) + |C_j^-|^2 \left( e^{2\operatorname{Im}(k_j)(X_j^1 - X_{j-1}^1)} - 1 \right) \right] \cdot \begin{cases} \frac{\operatorname{Re}(k_j)}{n_0 \cos \theta_0}, s - \text{пол.} \\ n_0 \operatorname{Re} \left( \frac{k_j}{\varepsilon_j} \right) \\ \frac{1}{\cos \theta_0}, p - \text{пол.} \end{cases}$$

$$R_{abs,osc_j} = \operatorname{Im} \left[ C_j^+ C_j^{-*} \left( e^{2\operatorname{Re}(k_j)(X_j^1 - X_{j-1}^1)} - 1 \right) \right] \cdot \begin{cases} \frac{2 \operatorname{Im}(k_j)}{n_0 \cos \theta_0}, s - \text{пол.} \\ \frac{2n_0 \operatorname{Im} \left( \frac{k_j}{\varepsilon_j} \right)}{\cos \theta_0}, p - \text{пол.} \end{cases} \quad (1.24)$$

где  $R_{abs_j}$  - коэффициент поглощения в  $j$  интервале,  $R_{abs,sec_j}$  - всюду неотрицательная часть коэффициента, отвечающая за монотонное затухание ЛИ,  $R_{abs,osc_j}$  - знакопеременная часть коэффициента, учитывающая интерференцию падающей и отражённой волн.

После подсчёта коэффициентов проводится проверка выполнения тождества

$$\sum_{j=1}^N R_{abs_j} + R_{rr} + R_{rfl} = 1 \quad (1.25)$$

Если оно не выполняется, то необходимо пересчитать коэффициенты в зависимости от знака  $R_{abs,osc_j}$ . Коэффициент  $R_{rfl}$  изменениям не подвергается.

Если  $R_{abs,osc_j}$  неположительное, тогда считается, что сумма монотонных коэффициентов поглощения больше, чем необходимо. Поэтому выбирается и отрезается некоторый «хвост» от их суммы, после чего пересчитывается коэффициент энергии ЛИ, ушедшей из системы.

$$R'_{abs} = \sum_{j=1}^{N'} R_{abs,sec_j} \leq 1 - R_{rfl}; N' \leq N,$$

$$\tilde{R}_{abs_j} = \begin{cases} R_{abs,sec_j}, 1 \leq j \leq N' \\ \min(R_{abs,sec_N}, 1 - R_{rfl} - R'_{abs}), j = N', \\ 0, j > N' \end{cases}$$

$$\tilde{R}_{tr} = 1 - R_{rfl} - \sum_{j=1}^{N'} \tilde{R}_{abs_j}.$$

Если  $R_{abs,osc_j}$  положительное, тогда считается, что сумма монотонных коэффициентов поглощения мала, поэтому каждый монотонный коэффициент пересчитывается как

$$\tilde{R}_{abs_j} = R_{abs,sec_j} \cdot \frac{R_{abs,sec} + R_{abs,osc}}{R_{abs,sec}}.$$

Коэффициент энергии ЛИ, ушедшей из системы, не меняется.

Существует и иной подход к расчёту коэффициентов отражения и поглощения ЛИ на области закритической плотности, основанный на формулах Френеля. Их применение для случая s- и p-поляризованного лазерного излучения позволяет получить амплитуды отражённого и преломлённого света:

$$r_s = \left| \frac{k_J - \langle \eta \rangle_i \cos \theta_i}{k_J + \langle \eta \rangle_i \cos \theta_i} \right|^2,$$

$$r_p = \left| \frac{k_J \langle \eta \rangle_i - \varepsilon_J \cos \theta_i}{k_J \langle \eta \rangle_i + \varepsilon_J \cos \theta_i} \right|^2,$$
(1.26)

где  $k_J$  - коэффициент k, определённый в ячейке, до которой дошёл луч, идущий по закритической области,  $\langle \eta \rangle_i$  - показатель преломления в ячейке, где произошёл переход от геометрической к волновой оптике,  $\theta_i$  - угол падения к ячейке, где произошёл переход от геометрической к волновой оптике,  $\varepsilon_J$  - значение диэлектрической проницаемости, определённой в ячейке, до которой дошёл луч, идущий по закритической области.

Коэффициент отражения в таком случае равен:

$$R_{rfl} = |r|^2.$$

Коэффициент поглощения будет определен как

$$R_{abs} = 1 - |r|^2.$$

Данный подход нами в рассматриваемой модели будет применяться по отношению к тестовым задачам, при необходимости сравниваться с точным решением или получений некоторого численного решения в первом приближении.

## 2. Численное исследование модели поглощения ЛИ в области закритической плотности.

Для изучения потенциальных особенностей, которые могут находиться в рассматриваемой модели, были проведены исследования её свойств, а именно, влияния параметров расчётной сетки и вида профиля диэлектрической проницаемости на результат моделирования.

Приведём постановку задачи: с левой стороны на плоский слой вещества, расположенного в отрезке  $0 \leq z \leq z_{max}$ , под углом  $\theta$  к нормали падает плоская

монохроматическая линейно поляризованная электромагнитная волна с круговой частотой  $\omega$ . Диэлектрическая проницаемость вещества равна  $\varepsilon$ , при  $z < 0, z > z_{\max}$ , диэлектрическая проницаемость равна 1. Требуется найти коэффициенты поглощения, отражения и выхода из системы.

Определим параметры системы:

- Число ячеек счётной области: 10, 100 и 1000;
- Шаг по равномерной сетке  $h = 0.1, 0.01, 0.001$ ;
- Размер счётной области в безразмерных координатах - 1, 0.1, 0.01;
- Значение комплексной диэлектрической проницаемости в ячейке  $\varepsilon_j = -54.56 + 67.2i$ ;
- Значение комплексной диэлектрической проницаемости на границе области  $\varepsilon_0 = \varepsilon_\infty = 1$ ;
- Угол падения  $\theta = [0, 90]$ ;

Элемент модели, касающийся расчётов выделяющейся энергий ЛИ в области критической плотности, был перенесён в ПП MATLAB. Над ним были проведены пробные вычисления сумм коэффициентов отражения  $R_{\Sigma_{rfl}}$ , поглощения  $R_{\Sigma_{abs,sec}}, R_{\Sigma_{abs,osc}}$  и выхода из системы  $R_{\Sigma_{tr}}$  по формулам (1.22) - (1.24).

Была рассмотрена задача, по условиям которой в расчётной области значения диэлектрической проницаемости одинаковы и представляют собой константу. В результате была построена зависимость коэффициентов поглощения от угла падения. Вид зависимости, представленной на рисунке 4, количественно и качественно повторяет аналитическое решение, с погрешностью порядка  $10^{-12}$ . Само аналитическое решение получено для

- коэффициента отражения:

$$R_{rfl} = \frac{\left| (1 - \gamma^2)(1 - e^{2ikL}) \right|^2}{D}, \quad (2.1)$$

где  $L = \frac{\omega z_{\max}}{c}$  - безразмерная координата,

$$k = k' + ik'' = \sqrt{\varepsilon^2 - \sin^2 \theta},$$

$$\gamma = \gamma' + i\gamma'' = \begin{cases} \frac{\cos \theta}{k}, & s\text{-пол.} \\ \frac{\varepsilon \cos \theta}{k}, & p\text{-пол.} \end{cases},$$

$$D = \left| (1 + \gamma)^2 - (1 - \gamma)^2 e^{2ikL} \right|^2;$$

- коэффициента выхода из системы:

$$R_{tr} = \frac{-16|\gamma|^2 e^{-2ikL}}{D}; \quad (2.2)$$

- коэффициентов поглощения:

$$R_{abs} = R_{abs,sec} + R_{abs,osc},$$

$$R_{abs,sec} = \frac{4\gamma'(1 - e^{-2k''L}) \left( |1 + \gamma|^2 + e^{-2k''L} |1 - \gamma|^2 \right)}{D}, \quad (2.3)$$

$$R_{abs,osc} = \frac{-8\gamma'' e^{-2k''L} \left[ f_1 \sin(2k'L) + f_2 (1 - \cos(2k'L)) \right]}{D},$$

где

$$f_1 = (1 - |\gamma|^2) \cos(2k'L) + 2\gamma'' \sin(2k'L),$$

$$f_2 = (1 - |\gamma|^2) \sin(2k'L) - 2\gamma'' \cos(2k'L),$$

- долей энергий на единичном интервале безразмерной координаты

$$x = \frac{\omega z}{c} (0 \leq x \leq L):$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{abs}}{dx} &= \frac{dR_{abs,sec}}{dx} + \frac{dR_{abs,osc}}{dx}, \\ \frac{dR_{abs,sec}}{dx} &= \frac{8k'' \gamma' (|1 + \gamma|^2 e^{-2k'x} + e^{-2k'L} |1 - \gamma|^2 e^{-2k'(L-x)})}{D}, \\ \frac{dR_{abs,osc}}{dx} &= \frac{-16k' \gamma'' e^{-2k'L} [f_1 \cos(2k'x) + f_2 \sin(2k'x)]}{D}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

В приведённом решении должны выполняться условия:

$$\int_0^L \frac{dR_{abs,sec}}{dx} dx = R_{abs,sec}, \int_0^L \frac{dR_{abs,osc}}{dx} dx = R_{abs,osc}, R_{rfl} + R_{tr} + R_{abs} = 1. \quad (2.5)$$

На рисунке 4 дополнительно показаны зависимости коэффициентов поглощения полученные для линейно растущего и зашумленного профилей (вид профилей представлен на рисунке 5), отличающихся от результата на постоянном профиле на 2% и 3% соответственно. При анализе расчётов данных профилей была подтверждена зависимость результатов расчёта от шага сетки при непостоянных значениях диэлектрической проницаемости.

Для постоянного профиля был получен вид зависимости коэффициентов поглощения при угле падения в 30 градусов на единицу доли поглощённой энергии на сгущающихся сетках для оценки скорости затухания поглощения и сходимости к аналитическому решению (1.31) (рисунок 7). Для осциллирующих членов также была получена такая зависимость. Для оценки влияния размеров области, которая считается оптически толстой, на значения коэффициентов, были проведены подобные вычисления на областями, уменьшенными в 10 и 100 раз. По результатам расчётов над ними, была показана быстрая сходимость по сетке, не зависящая от размера области (рисунок 8-9). На рисунках 7-9, кривые, отвечающие за наименьший шаг сетки в серии расчётов в определённой области, сливаются с кривыми аналитического решения при выбранном масштабе графиков.

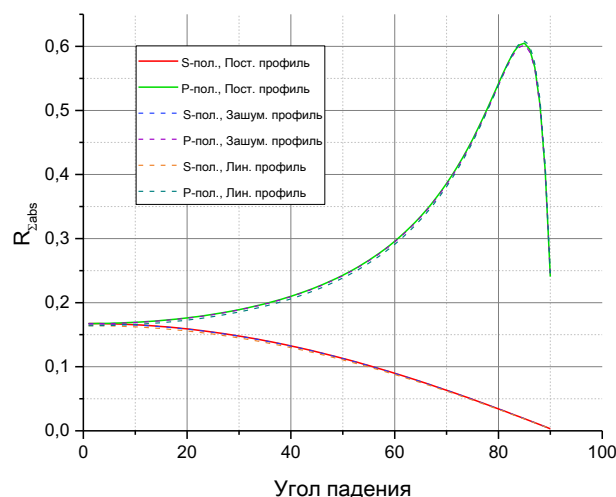


Рисунок 4 – Зависимость коэффициентов поглощения от угла падения



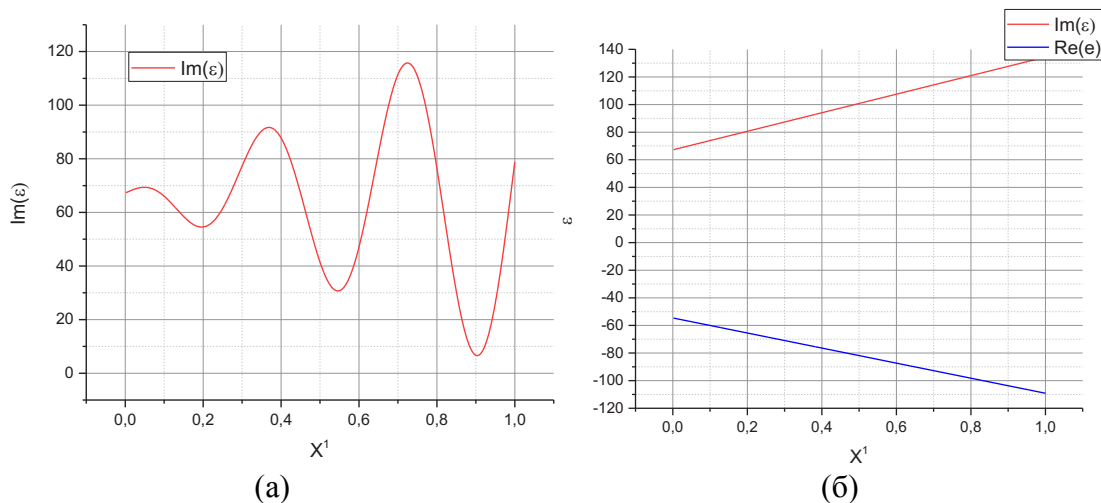


Рисунок 5 – Вид мнимой компоненты зашумленного профиля (а) и линейного профиля (б) комплексной диэлектрической проницаемости

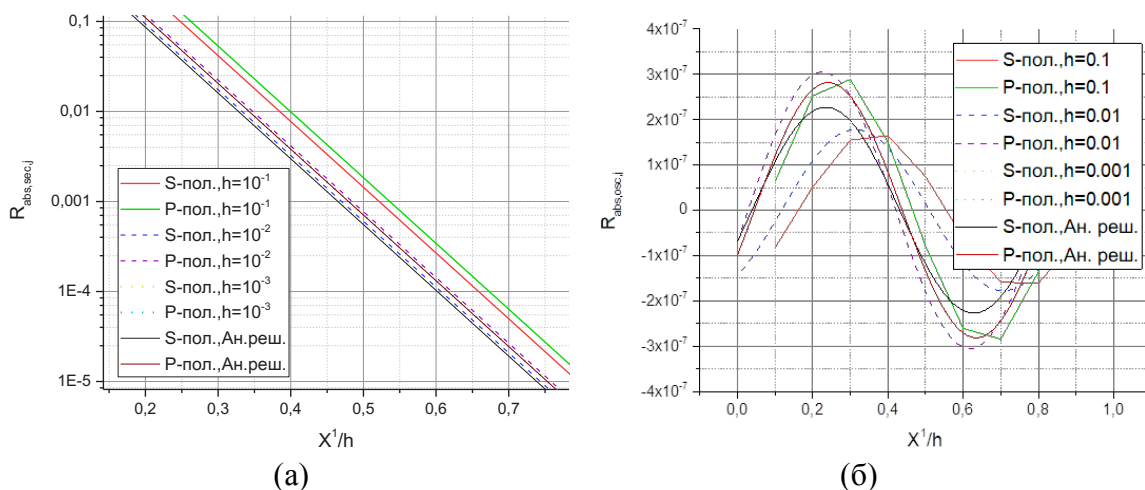


Рисунок 7 - Зависимость монотонных (а) и осциллирующих (б) коэффициентов поглощения на сгущающихся сетках для постоянного профиля диэлектрической проницаемости для области размером 1

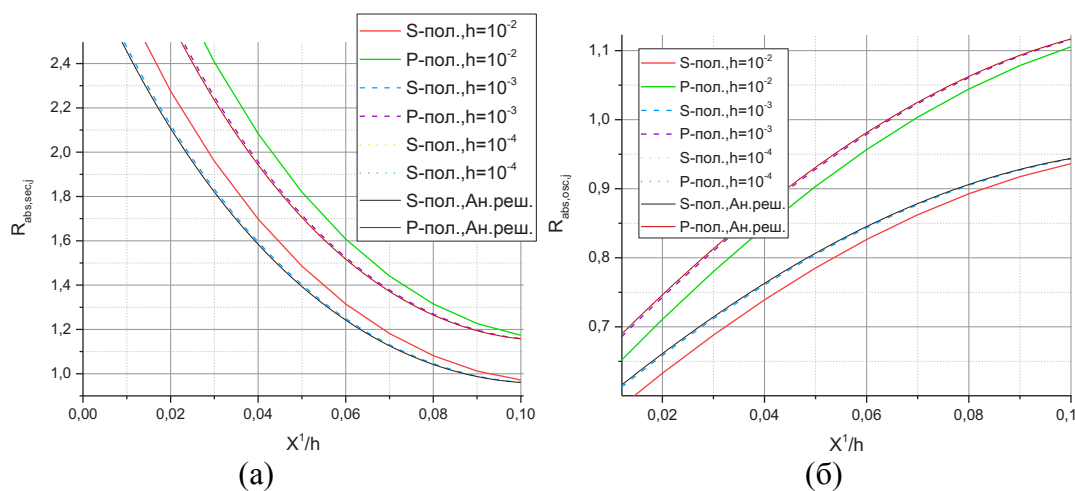


Рисунок 8 - Зависимость монотонных (а) и осциллирующих (б) коэффициентов поглощения на сгущающихся сетках для постоянного профиля диэлектрической проницаемости для области размером 0.1

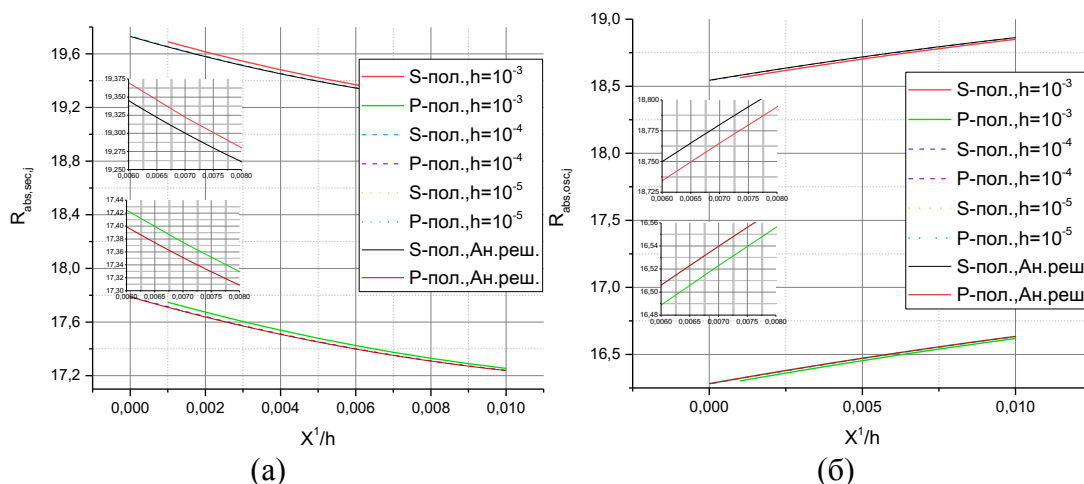


Рисунок 9 - Зависимость монотонных (а) и осциллирующих (б) коэффициентов поглощения на сгущающихся сетках для постоянного профиля диэлектрической проницаемости для области размером 0.01

### Заключение

Была построена новая модель взаимодействия лазерного излучения веществом с учётом мирового опыта в этой области, позволяющая учитывать явление рефракции ЛИ и поглощение энергии в области закритической плотности.

Был описан алгоритм трассировки лучей лазерного излучения и механизм расчёта коэффициентов поглощения, отражения и выхода из системы ЛИ при вычислении в области закритической плотности электронов.

В программном пакете MATLAB реализована модель расчёта поглощения ЛИ в закритической области.

Были проведены численные исследования, показывающие совпадение полученных результатов с аналитическим решением. Получено, что для случая постоянного профиля диэлектрической проницаемости имеет место быстрая сходимость по сетке, не зависящая от размеров области.

Дальнейшее рассмотрение модели требует построение отдельной программы или внедрение в уже существующую, поскольку для последующей работы необходима информация, которую можно получить при решении уравнений массо- и теплопереноса.

### Использованные источники:

1. Бойко В.И (Томский политехнический университет), Управляемый термоядерный синтез и проблемы инерциального термоядерного синтеза // Соросовский образовательный журнал №6, 1999. - С. 97-104.
2. Лебо И.Г., Тишкин В.Ф. Исследование гидродинамических неустойчивостей в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с.
2. T.B. Kaiser, Phys.Rev. E 61, 895(2000), 895-905. Doi:10.1103/PhysRevE.61,895.
3. Basko M.M., Tsygvintsev I.P., A hybrid model of laser energy deposition for multidimensional simulations of plasmas and metals // Comput. Phys. Commun., 2017. Vol. 214. PP. 59-70.
4. Ovechkin A.A., Loboda P.A., Falkov A.L. Transport and dielectric properties of dense ionized matter from the average-atom RESEOS model // HEDP. – 2016. – Vol. 20. – Pp. 38 - 54

## ПОЯВЛЕНИЕ ЗАКРУТКИ В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Левунина Э.С.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[eslevunina@po-mayak.ru](mailto:eslevunina@po-mayak.ru)

Аннотация. В статье рассматривается газодинамическая модель при продуве вверх. Предложен вариант отслеживания закрутки потока за счёт силы Кориолиса.

*Ключевые слова:* полная система уравнений Навье-Стокса, явная разностная схема, восходящий закрученный поток.

## THE APPEARANCE OF A TWIST IN THE UPDRAFT WHEN MODELING IN A CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM

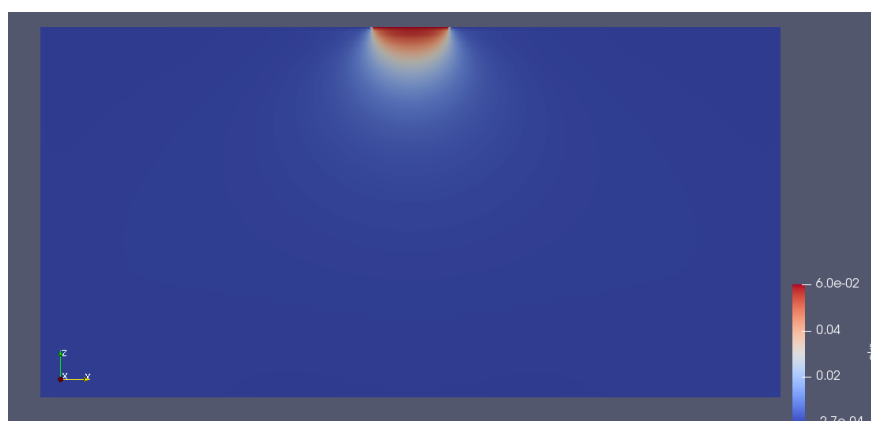
Levunia E. S.

*Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI,  
Chelyabinsk region*  
[eslevunina@po-mayak.ru](mailto:eslevunina@po-mayak.ru)

Abstract. The article considers the gas dynamic model of upward purging. A variant of tracking the twisting of the flow due to the Coriolis force is proposed.

*Keywords:* complete system of Navier-Stokes equations, explicit difference scheme, upward swirling flow

Поставлена газодинамическая задача в цилиндрических координатах. Осуществляется продув с верхней грани цилиндра. Модель задана в виде системы безразмерных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого вязкого теплопроводного газа с учётом влияния поля силы тяжести и силы Кориолиса. Подобные задачи считались численно в декартовых координатах [2,3]. Необходимо проверить, что в предложенном решении [4] появляется закрутка за счёт влияния силы Кориолиса. Проверить появление закрутки по расчётным значениям окружной скорости не представляется возможным, поскольку возникают сложные движения в горизонтальной плоскости из-за вертикального движения газа. Вертикальная составляющая скорости движения газа по гармоническому закону влияет на радиальную и окружную составляющие скорости, закрутка появляется за счёт радиальной составляющей скорости [1]. Численное решение предложенной задачи визуализируется с помощью пакета ParaView [5].



На рисунке 1 представлена вертикальная составляющая скорости газа в вертикальном срезе, на рисунке 2 радиальная составляющая скорости в двух горизонтальных срезях.

Рисунок 1. Вертикальный разрез вертикальной составляющей скорости через 1 минуту продува.

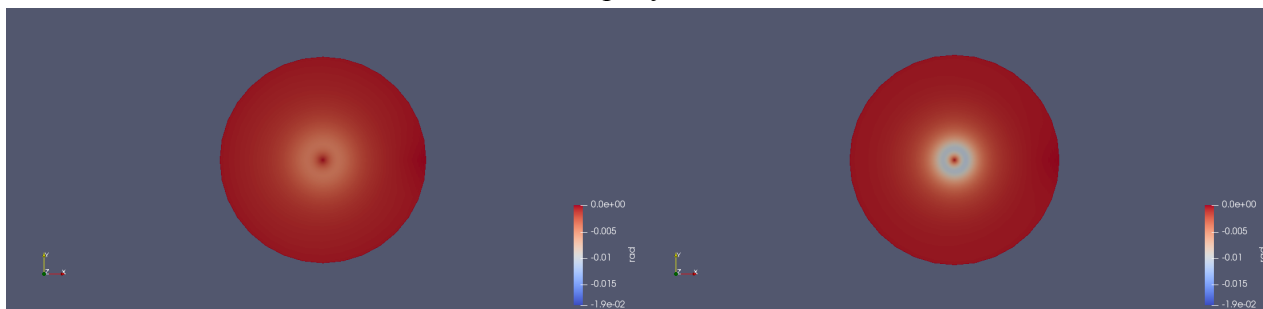


Рисунок 2. Радиальная составляющая скорости через 1 минуту. Горизонтальный срез на высоте 0.8(слева) и 0.9(справа).

Можно утверждать, что влияние радиальной скорости на движение воздуха будет гораздо меньше, чем влияние скорости вертикальной. Визуализация в двух горизонтальных срезях окружной скорости на рисунке 3 ожидаемо не даёт ответа на вопрос, возникает ли закрутка при вертикальном продуве.

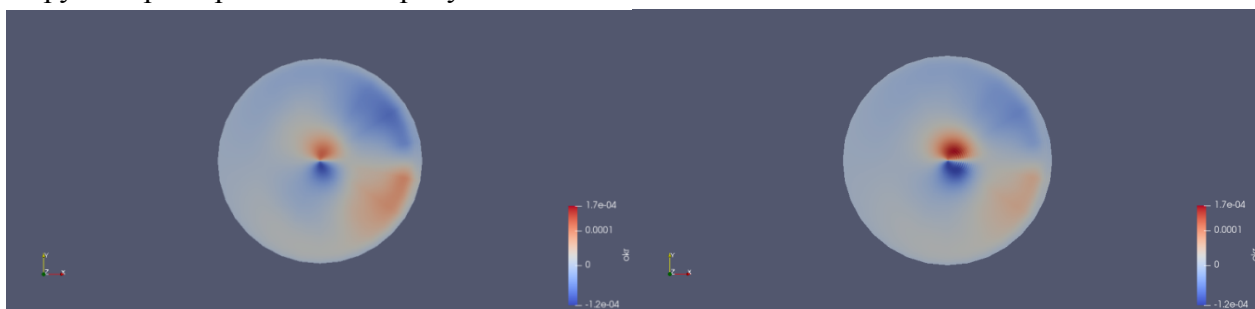


Рисунок 3. Радиальная составляющая скорости через 1 минуту. Горизонтальный срез на высоте 0.8 и 0.9.

Наблюдение линий тока газа на рисунке 4 оказалось наиболее информативным с точки зрения закручивания вертикального потока воздуха. Через минуту продува можно наблюдать искривление линий тока по направлению против часовой стрелки. Данное наблюдение совпадает с результатами моделирования продува в декартовых координатах.

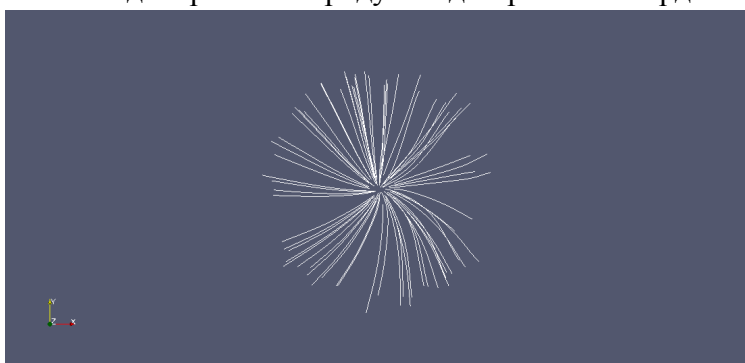


Рисунок 4. Вид сверху на линии тока через 1 минуту.

*Использованные источники:*

1. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. – Новосибирск: Наука, 2008. - 96 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков Екатеринбург: УрГУПС, 2020.
3. Баутин С.П., Обухов А.Г. Численное моделирование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа. Екатеринбург: УрГУПС, 2020.

4. Баутин С.П. Кононов С.Н. Левунина Э.С. Численное моделирование течений в восходящих закрученных потоках с использованием разностной схемы. Математические структуры и моделирование. № 3 (63). Омск, 2022.
5. Левунина Э.С., Кононов С.Н. Визуализация расчётных параметров газа в цилиндрических координатах при организации продува вверх. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Санкт-Петербург, 21-25 августа 2023 г.

## ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РЯДА $c_n$ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА В ВАКУУМ НА КОСОЙ СТЕНКЕ

Понькин Е.И.

ФГУП «Производственное объединение «Маяк», Челябинская обл., Озерск  
[cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

**Аннотация.** В настоящей работе приведен результат построения и анализ дифференциального уравнения для нахождения коэффициента ряда  $c_n$  аналитического решения задачи, описывающего разлет газа в вакуум на косоугольной стенке в общем несогласованном случае. Решение задачи строится в виде рядов функций  $c$ ,  $u$  и  $v$  по степеням  $\vartheta$ , где  $\vartheta$  – известная функция автомодельных переменных  $\xi = x/t$ ,  $\eta = y/t$ . Показано, что построенное уравнение для коэффициента ряда  $c_n$  есть линейное неоднородное дифференциальное уравнение. Коэффициенты, входящие в уравнение, и неоднородная часть уравнения являются аналитическими функциями переменной  $\xi$ . Таким образом, особенность полученного решения СУГД [1] является единственной, и полностью определяет характер течения в области двойной волны сжатия.

*Ключевые слова:* характеристическая задача Коши стандартного вида, транспортное уравнение, аналитическое решение, система уравнений газовой динамики.

## CONSTRUCTION OF AN EQUATION TO FIND THE COEFFICIENT OF THE SERIES $c_n$ OF THE SOLUTION TO THE PROBLEM OF GAS EXPANSION INTO VACUUM ON AN INCLINED WALL

E.I. Ponkin

FSUE Mayak Production Association, Ozyorsk, Chelyabinsk Region  
[cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru)

**Abstract.** The paper presents the result of constructing and analyzing a differential equation for finding the coefficient of the series  $c_n$  of an analytical solution to the problem describing the expansion of gas into vacuum on an inclined wall in the general inconsistent case. The solution to the problem is constructed in the form of series of functions  $c$ ,  $u$  and  $v$  in powers of  $\vartheta$ , where  $\vartheta$  is a known function of self-similar variables  $\xi = x/t$ ,  $\eta = y/t$ . It is shown that the constructed equation for the coefficient of the series  $c_n$  is a linear inhomogeneous differential equation. The coefficients included in the equation and the inhomogeneous part of the equation are analytical functions of the variable  $\xi$ . Thus, the peculiarity of the obtained SEGД solution [1] is shown to be the only one and to determine completely the nature of the flow in the region of the double compression wave.

*Keywords:* characteristic Cauchy problem of standard form, transport equation, analytical solution, system of equations of gas dynamics

Рассматривается начально-краевая задача, описывающая при  $t > 0$  истечение политропного газа в вакуум с косоугольной стенки, а при  $t < 0$  сжатие призматического объема в несогласованном случае [1]:

$$\begin{cases} \left( (\mathbf{B})_0 - f'(\xi)(\mathbf{A})_0 \right) \mathbf{U}_\vartheta + (\mathbf{A})_0 \mathbf{U}_\xi = 0, \\ \mathbf{U}|_{\vartheta=0} = \mathbf{U}_0, \\ v|_{y=x \operatorname{tg} \alpha} = u \operatorname{tg} \alpha|_{y=x \operatorname{tg} \alpha}. \end{cases} \quad (1)$$



где  $\mathbf{U} = (c, u, v)^T$ . Матрицы  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  соответственно равны:

$$(\mathbf{A})_0 = \begin{pmatrix} u - \xi & \varkappa c & 0 \\ c/\varkappa & u - \xi & 0 \\ 0 & 0 & u - \xi \end{pmatrix}, (\mathbf{B})_0 = \begin{pmatrix} v - \vartheta - f(\xi) & 0 & \varkappa c \\ 0 & v - \vartheta - f(\xi) & 0 \\ c/\varkappa & 0 & v - \vartheta - f(\xi) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

здесь функция  $f(\xi)$  задает в пространстве переменных  $\xi, \eta$  звуковую характеристику ( $\vartheta = 0$ ), разделяющую плоское течение и течение типа двойной волны,  $\varkappa = (\gamma - 1)/2$ .

Третье уравнение системы (1) задает условие непротекания на косой стенке.

Решение (1) строится в виде сходящегося ряда по степеням  $\vartheta$ :

$$\mathbf{U}(\xi, \vartheta) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{U}_k(\xi) \frac{\vartheta^k}{k!}; \quad \mathbf{U}_k(\xi) = \left. \frac{\partial^k \mathbf{U}}{\partial \vartheta^k} \right|_{\vartheta=0}. \quad (3)$$

Алгоритм построения решения задачи (1) в виде ряда (3) основан на аналоге теоремы Ковалевской, доказанной в работе [2]. Коэффициенты ряда  $u_1$  и  $v_1$  находят в результате подстановки в систему (1) значения  $\vartheta = 0$ . Значение коэффициента  $c_1$  строится из решения транспортного уравнения, которое получается в результате дифференцирования по переменной  $\vartheta$  СУГД задачи (1) и подстановки в нее значения  $\vartheta = 0$  (см. работу [1]).

Коэффициент  $c_n$  ряда (3) находят из решения уравнения, которое строится путем дифференцирования  $n$  раз по  $\vartheta$  системы из задачи (1) и подстановки в нее значения  $\vartheta = 0$

$$[(\mathbf{B})_0 - f'(\mathbf{A})_0] \mathbf{U}_{n+1} - n \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{U}_n + (\mathbf{A})_0 \mathbf{U}'_n + \sum_{k=1}^n C_n^k [(\mathbf{B}_k - f'_\xi \mathbf{A}_k) \mathbf{U}_{n+1-k} + \mathbf{A}_k \mathbf{U}'_{n-k}] = \mathbf{0}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{U}_\vartheta^{(k)} = \mathbf{U}_k = (c_k, u_k, v_k)^T$ ,  $\mathbf{U}_{\vartheta\xi}^{(k)} = \mathbf{U}'_k = (c'_k, u'_k, v'_k)^T$ ,  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ , а  $\mathbf{E}$  - единичная

матрица. Из второго и третьего уравнения системы (4) выразим  $u_{n+1}$  и  $v_{n+1}$

$$u_{n+1} = \frac{1}{c_0 f' - f} \left[ \frac{c_0}{\varkappa} f' c_{n+1} - \frac{c_0}{\varkappa} c'_n + c_0 u'_n + n u_n \right] - \frac{1}{c_0 f' - f} \sum_{k=1}^n C_n^k \left[ -\frac{c_k}{\varkappa} f' c_{n+1-k} + (v_k - f' u_k) u_{n+1-k} + \frac{c_k}{\varkappa} c'_{n-k} - u_k u'_{n-k} \right], \quad (5)$$

$$v_{n+1} = \frac{1}{c_0 f' - f} \left[ -\frac{c_0}{\varkappa} c_{n+1} + c_0 v'_n + n v_n - \sum_{k=1}^n C_n^k \left[ \frac{c_k}{\varkappa} c_{n+1-k} + (v_k - f' u_k) v_{n+1-k} + u_k v'_{n-k} \right] \right]. \quad (6)$$

Используя выражения (5), (6) можно получить формулы для  $u_n$ ,  $v_n$  при замене в них значений  $n+1 \rightarrow n$ . При подстановке  $u_{n+1}$  и  $v_{n+1}$  в первое уравнение системы (4) получаем дифференциальное уравнение для коэффициента  $c_n$ :

$$\begin{aligned}
 & \left( f'c'_n + \chi c'_0 v'_n - \chi f' u'_n \right) + n c_0 \left( \chi v'_n - \chi f' u'_n - \frac{c_0 f' - f}{c_0} c'_n \right) - \\
 & - \sum_{k=1}^n C_n^k \left( \left( v'_k - f' u'_k - \frac{c_0 f' - f}{c_0} c'_k \right) \left( \chi v'_{n+1-k} - \chi f' u'_{n+1-k} - \frac{c_0 f' - f}{c_0} c'_{n+1-k} \right) - \right. \\
 & \left. - c'_{n-k} \left( f' c'_k + u'_k \frac{c_0 f' - f}{c_0} \right) + \chi u'_{n-k} \left( f' u'_k + c'_k \frac{c_0 f' - f}{c_0} \right) + \chi u'_k v'_{n-k} \right) = 0.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Построенное уравнение (7) для коэффициента ряда  $c_n$  есть линейное неоднородное дифференциальное уравнение. Коэффициенты, входящие в уравнение, и неоднородная часть уравнения являются аналитическими функциями переменной  $\xi$ . Таким образом, особенность полученного решения СУГД [1] является единственной, и полностью определяет характер течения в области двойной волны сжатия.

*Использованные источники:*

1. Понькин, Е. И. Автомодельное решение системы уравнений газовой динамики, описывающей истечение политропного газа в вакуум с косою стенки в несогласованном случае // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2023. – № 2. – С. 27–39.
2. Понькин Е. И. Характеристическая задача Коши стандартного вида для описания истечения политропного газа в вакуум с косою стенки// Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки., 2022. Т.26, №2. С. 322-338.

## ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ С УЧЕТОМ РЕФРАКЦИИ И ОТРАЖЕНИЯ

Юсупов Ю. Ф.<sup>1,2</sup>, Глазырин И. В.<sup>1,2</sup>, Говрас Е. А.<sup>1</sup>, Михайлов Н. А.<sup>1</sup>, Титова А. М.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.  
<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.  
[yusupovyuf@vniitf.ru](mailto:yusupovyuf@vniitf.ru)

Для расчёта поглощения лазерного излучения веществом в приближении геометрической оптики в трёхмерную газодинамическую программу добавлен численный метод моделирования распространения излучения в среде. Реализованы отражение лучей от поверхности критической плотности и рефракция. Модель поглощения основана на обратнотормозном механизме в докритической области. В закритической области для определения поглощенной энергии использовались формулы Френеля.

Численный метод верифицирован на одномерной и двумерной задачах, которые имеют аналитическое решение. Модель является универсальной и способна работать в одномерной, двумерной (в том числе и осесимметричной) и трёхмерной геометриях.

*Ключевые слова:* приближение геометрической оптики, обратнотормозное поглощение, трассировка, критическая плотность электронов, рефракция, верификация, анализ экспериментальных данных

## THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL OF THE INTERACTION OF LASER RADIATION WITH MATTER IN THE GEOMETRIC OPTICS APPROXIMATION, TAKING INTO ACCOUNT REFRACTION AND REFLECTION

Yusupov Yu. F.<sup>1,2</sup>, Glazyrin I. V.<sup>1,2</sup>, Govras E.A.<sup>1</sup>, Mikhaylov N. A.<sup>1</sup>, Titova A. M.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin», Snezhinsk, Chelyabinsk region  
<sup>2</sup>Snezhinsk Physics and Technology Institute of National Research Nuclear University  
 MEPHI, Snezhinsk, Chelyabinsk region  
[yusupovyuf@vniitf.ru](mailto:yusupovyuf@vniitf.ru)

To simulate the laser absorption by matter in the geometric optics approximation, a numerical method for modeling the propagation of radiation in a medium has been added to the three-dimensional fluid dynamics program. Reflection of rays from a surface of critical density and refraction are implemented. The absorption model is based on the inverse-Bremsstrahlung mechanism in the subcritical region. In the supercritical region, Fresnel formulas were used to determine the absorbed energy.

The numerical method has been verified on one-dimensional and two-dimensional problems that have an analytical solution. The model is universal and can work in one-dimensional, two-dimensional (including axisymmetric) and three-dimensional geometries.

*Keywords:* geometric optics approximation, inverse-Bremsstrahlung absorption, ray tracing, critical electron density, refraction, verification, analysis of experimental data

Для исследования развития газодинамических неустойчивостей используются мощные лазерные установки [1,2,3]. Большое количество работ посвящено численному моделированию взаимодействия лазерного импульса с веществом [4]. В трёхмерную газодинамическую программу [5], предназначенную для расчётов перемешивания веществ, добавлен учёт распространения и поглощения энергии лазерного излучения. Выбрана

модель, основанная на приближении геометрической оптики с механизмом обратно-тормозного поглощения, рефракцией и отражением.

Модель описана в [6] и имеет Следующие особенности:

- траектория луча внутри ячейки является прямолинейной;
- на гранях ячеек учитывается преломление и отражение каждого луча;
- лазерный пучок формируется в произвольной области внутри или вне расчетной неструктурированной сетки с помощью двух формирующих эллипсов;
- используется однотемпературное приближение с определением среднего атомного заряда и веса вещества с помощью табличных значений;
- программа распараллелена на общей и распределенной памяти, формирование лазерного пучка возможно как в последовательном, так и в параллельном режиме на декомпозированной сетке.

Суммарная энергия пучка  $Q$  вычисляется по формуле

$$Q(t) = \int_{t_0}^t P(t') dt' \approx \sum_{t_0}^t \frac{P(t_{i+1}) - P(t_i)}{2} (t_{i+1} - t_i), \quad (1)$$

где  $P(t)$  – функция распределения мощности пучка (изотропное, гауссово или супергауссово). Также, в отличие от работы, представленной в [6], добавлена возможность задавать плотность лучей пропорционально распределению энергии внутри пучка. Величина энергии пучка за один временной шаг определяется методом трапеций:

$$Q_n = \frac{P(t_{i+1}) - P(t_i)}{2} (t_{i+1} - t_i) = \sum_{j=0}^{N_{\text{лучей}}} q_j. \quad (2)$$

Потеря энергии  $j$ -го луча зависит от пройденного расстояния внутри ячейки  $l_i$

$$q_j = q_{j0} \cdot e^{-K_i^{\text{отп}} l_i}. \quad (3)$$

Здесь  $K_i^{\text{отп}}$  – коэффициент обратно-тормозного поглощения, который определяется как:

$$K^{\text{отп}} = \frac{\sqrt{2}\omega}{c} \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\eta}} \sqrt{\sqrt{1+\eta} \sqrt{1 + \frac{\eta}{(1-\xi)^2}} - \frac{\eta}{1-\xi}} - 1, \quad \xi = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{n_e}{n_{cr}}, \eta = \frac{v_{ei}^2}{\omega^2}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – круговая частота лазерного излучения,  $\omega_p$  – плазменная частота,  $v_{ei}$  – частота электрон-ионных столкновений для данного вещества (может вычисляться как по формулам, так и с помощью логарифмической интерполяции таблиц),  $c$  – скорость света,  $n_{cr}$  – критическая плотность электронов,  $n_e$  – плотность электронов.

Преломление луча на границе двух ячеек описывается с помощью закона Снелла [7]. Луч может преломиться на границе ячейки, пройти без изменения направления в случае падения луча по нормали к грани ячейки, либо отразиться в случае достижения критического угла падения или ячейки с критической плотностью (см. рисунок 1а).

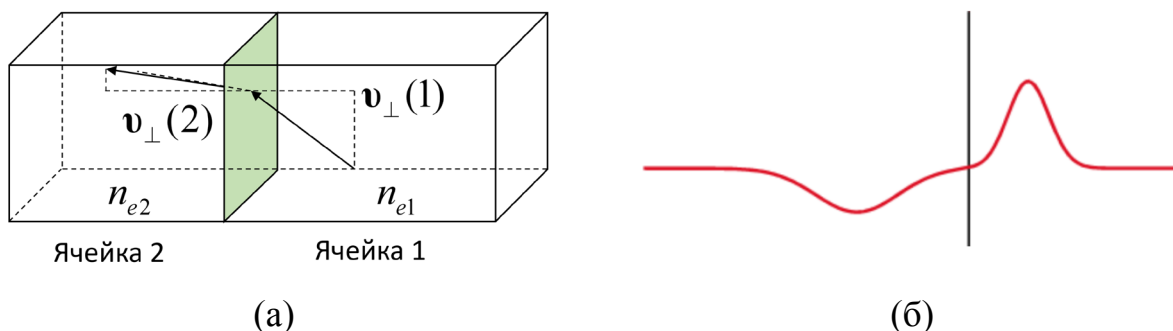


Рисунок 1 – Изменение направления движения луча на грани ячейки (а) и схематическое

описание изменения амплитуды электромагнитной волны после отражения от критической плотности согласно формулам Френеля (б)

Важной особенностью приближения геометрической оптики является невозможность проникновения излучения в закритическую плазму. Как правило, данная проблема решается поглощением всей падающей энергии в закритической области на начальном этапе распространения лазерного импульса [8], чего не происходит в реальности. На самом деле необходимо решать систему уравнений Максвелла, что требует огромных вычислительных ресурсов. Допустимым приближением является решение стационарного уравнения Максвелла – уравнения Гельмгольца, однако оно применимо лишь тогда, когда размер ячейки сильно меньше длины волны лазерного излучения, что также накладывает ограничение по вычислительным ресурсам. Поэтому был предложен подход, основанный на использовании формул Френеля [8], которые позволяют определить долю энергии, поглощающейся в закритической области (см. рисунок 1б). Данный метод используется на протяжении всего лазерного импульса, а не только на начальном этапе. Доля поглощенной энергии определяется как

$$A = 1 - \frac{1-r}{1+r}, r = \sqrt{2} \frac{\sqrt{1+\eta - \xi + \sqrt{1+\eta} \sqrt{\eta + (\xi - 1)^2}}}{\sqrt{1+\eta} + \sqrt{\eta + (\xi - 1)^2}}. \quad (5)$$

Был проведен расчет воздействия импульса лазерного излучения с максимальной интенсивностью  $I = 8,9 \cdot 10^{10} \text{ Bm/cm}^2$  и полной шириной на половине высоты  $t_{\text{шир}} = 0,75 \text{ нс}$  на медную мишень толщиной  $100 \text{ мкм}$ . Видно, что трёхмерный и двумерный осесимметричный расчеты дают близкую картину (см. рисунок 2).

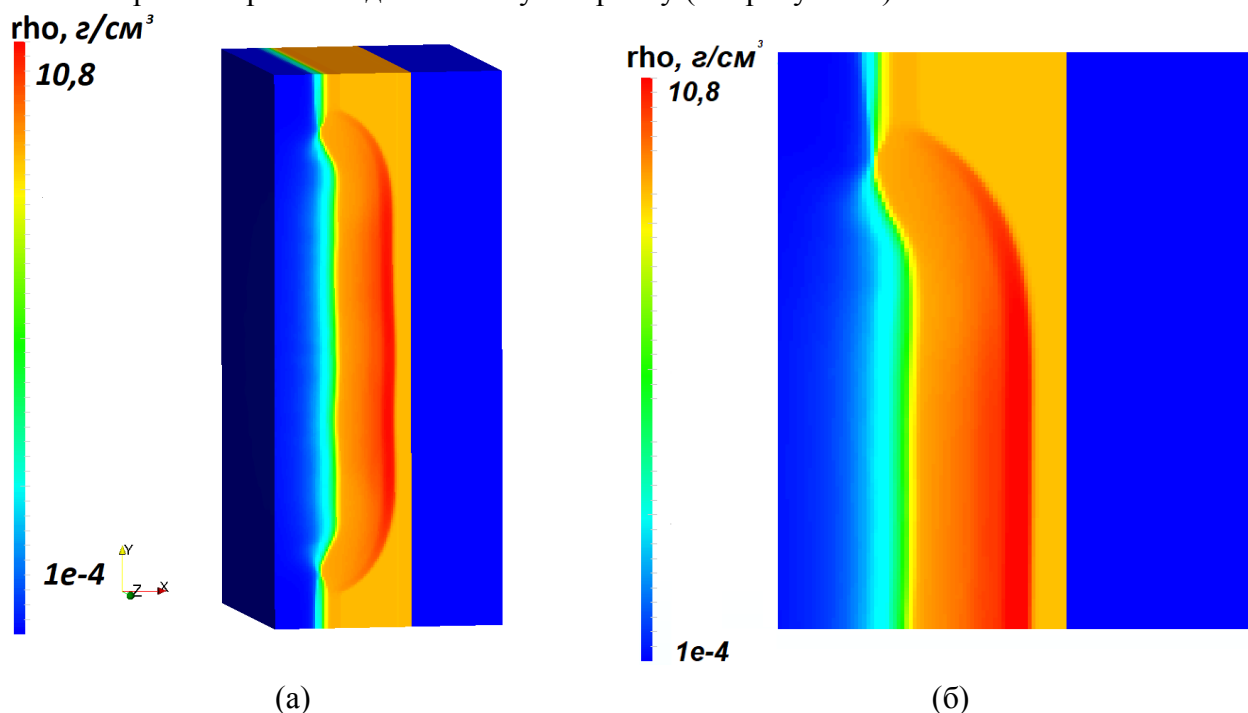


Рисунок 2 – Профили плотности в расчете на одинаковый момент времени  $t = 17 \text{ нс}$  от начала воздействия импульса лазерного излучения в трехмерном случае (а) и в двумерном осесимметричном случае (б)

Модель прошла верификацию на одномерной задаче о прохождении луча по системе с профилированной плотностью. Корректность определения направления луча после

преломления была проверена в двумерной постановке. Полученные численные результаты согласуются с аналитическими решениями с хорошей точностью. Проведен сравнительный расчет воздействия импульса лазерного излучения на медную мишень. Показано, что осесимметричный двумерный расчет удовлетворительно согласуется с трёхмерным расчетом.

*Использованные источники:*

1. McCrory R.L., Bahr R.E. et al. Omega ICF experiments and preparation for direct drive ignition on NIF // Nuclear Fusion – 2002.
2. K.S. Raman, O.A. Hurricane, H.S. Park, B.A. Remington, H. Robey, V.A. Smalyuk. Three-dimensional modeling and analysis of a high energy density Kelvin-Helmholtz Experiment Physics of Plasmas, 22 2012. LLNL-JRNL-531731
3. A.R. Miles, M.J. Edwards, B. Blue, J.F. Hansen, H.F. Robey, R.P. Drake, C. Kuranz, and D.R. Leibbrandt The effect of a short-wavelength mode on the evolution of a long-wavelength perturbation driven by a strong blast wave/ Physics of Plasmas 11, 5507 2004.
4. Dodd E. S., Benage J. F., Kyrala G. A. et al. The effects of laser absorption on direct-drive capsule experiments at OMEGA // PHYSICS OF PLASMAS. – 2012. P. 517-535.
5. Глазырин И.В., Михайлов Н.А. Конечно-объёмная схема для многокомпонентных сжимаемых течений на неструктурированной сетке в трёхмерной программе ФОКУС // ЖВМиМФ. – 2021. – 61, 6, – С.1019.
6. Ю.Ф. Юсупов, И.В. Глазырин, Е.А. Говрас, Н.А. Михайлов, А.М. Титова, М.Н. Чижков. Трёхмерное численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с веществом в приближении геометрической оптики // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 31 января – 2 февраля 2023г. – Москва: НИЯУ МИФИ.
7. Thomas V. Kaiser. Laser ray tracing and power deposition on an unstructured three-dimensional grid // PHYSICAL REVIEW E. – 1999. P. 219-240.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. Оптика. – 3-е изд. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 792 с.



## РЕАЛИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ C#

Брегеда А.И.<sup>1,2</sup>, Липатов А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», г. Снежинск, Челябинская обл.,

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.

[abregeda96@bk.ru](mailto:abregeda96@bk.ru)

В докладе описана программная реализация универсального алгоритма для расчета надежности структурно-сложных систем, выполненная с использованием объектно-ориентированного подхода.

*Ключевые слова:* структурно-сложные системы, показатели надежности, структурная схема надежности, алгоритмы и программы.

## EXECUTING A UNIVERSAL ALGORITHM TO CALCULATE THE RELIABILITY OF COMPLEX STRUCTURE SYSTEMS IN C#

Bregeda A.I.<sup>1,2</sup>, Lipatov A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FGUP "RFNC-VNIITF im. academician E.I. Zababakhina, Snezhinsk, Chelyabinsk region,

<sup>2</sup>FGAOU VO "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear  
University MEPHI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region

[abregeda96@bk.ru](mailto:abregeda96@bk.ru)

In the report a universal OOA-based algorithm is presented for structurally complex systems' reliability calculation.

*Key words:* structurally complex systems, reliability indexes, reliability flowchart, algorithms and codes.

Современные технические системы представляют собой структуры, состоящие из большого числа элементов, связанных и взаимодействующих между собой сложным образом. Структурные схемы надёжности (ССН) [1] таких систем зачастую не могут быть сведены к параллельно-последовательным или последовательно-параллельным фрагментам. Такие системы называются *структурно-сложными* [2].

Простой пример структурной схемы подобного типа приведен на рисунке 1. Особенность этой схемы заключается в том, что в ней применены «реверсивные» элементы 4 и 5, т.е. элементы, проводящие сигналы в двух противоположных направлениях.

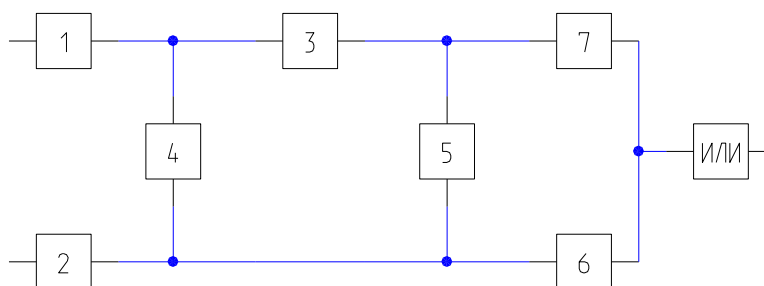


Рис.1. Схема с «реверсивными» элементами

Для расчёта показателей надёжности подобных систем был предложен универсальный алгоритм, известный под названием «прямой sharp» [3]. В нем множество состояний системы, состоящей из  $n$  элементов, определяется набором кубов – векторов специального вида:

$$C = \{c_1 c_2 \dots c_n\}, \quad (1)$$

где  $c_i$  – координата куба, представляющая  $i$ -й элемент:  $c_i = 0$ ,  $c_i = 1$ ,  $c_i = *$  означают, соответственно, что элемент неработоспособен, элемент работоспособен и элемент свободен (свободен в том смысле, что его состояние в данном наборе элементов не влияет на работоспособность системы).

Алгоритм «прямой sharp» определяет эффективный набор операций над кубами, позволяющий получить множество всех состояний, в которых система работоспособна, а именно, *несовместное покрытие события успеха SS множеством кубов*.

В данной работе предлагается вариант расчетного модуля для реализации названного алгоритма в виде компактного набора классов на языке C#.

Фундамент этого набора естественным образом формирует класс RlbCube – вектор, характеризующий множество состояний системы. Для удобства проведения логических операций в алгоритме «прямой sharp» предложено кодировать координаты куба двухбитовой комбинацией: “0”-10, “1”-01, “\*”-11, “null”-00. Следуя этому правилу, для представления самого куба RlbCube использованы два «параллельных» битовых массива BitArray.

На классах «куб» (RlbCube) и «набор кубов» (RlbCubeCollection) определены две основные операции: And и Sharp. Так как куб является множеством состояний системы, операции над кубами есть не что иное, как операции над множествами.

Операция And ( $A*B$ ), выполняемая с помощью логического покомпонентного умножения битовых массивов, соответствует пересечению кубов в терминах множеств.

Sharp ( $A\#B$ ) – «особая» операция со сложной логикой, не имеющая аналогов в битовых массивах. На уровне кубов операция  $A\#B$  соответствует вычитанию множества B из A, т.е. удалению из куба A тех состояний системы, которые уже присутствуют в кубе B. На уровне набора кубов операция  $\tilde{A}\#\tilde{B}$  соответствует объединению наборов с исключением дублирующих состояний системы.

Техническая система представлена классом RBD. Элементы системы, они же блоки RBD, описываются классом RlbBlock. Каждый блок имеет свойство Availability – вероятность безотказной работы (ВБР) элемента. Значения ВБР блоков задаются как исходные данные.

Для класса RBD определено свойство Cubes – коллекция кубов RlbCube. Первоначально это набор кубов, в качестве исходных данных описывающий ССН системы. В результате применения алгоритма «прямой sharp» эта коллекция кубов превращается в *несовместное покрытие события «система работоспособна»*. На основе последней, используя значения ВБР блоков (RlbBlock.Availability) и применяя классическую формулу полной вероятности, расчетный модуль вычисляет итоговую ВБР системы (RBD.Availability).

#### Результаты работы:

1) Разработана система классов на языке C# и расчетный модуль, основанный на алгоритме «прямой sharp».

2) В ходе экспериментальных расчётов показателей надёжности, проведенных над тестовыми ССН, получены корректные результаты.

#### *Использованные источники:*

1. ГОСТ Р МЭК 61078-2021. Надежность в технике. Структурная схема надежности: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2022-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – М.: Стандартинформ, 2023 г. – 94 с.
2. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981 г. – 264 с.
3. Xu W., Shi D., Chen H. General algorithms for calculating system reliability. // Microelectronics and reliability. – 1987. – Vol. 27, №3. – P. 413-418.

## КОНЦЕПТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОМОЩНИКА ДЛЯ ПЕЧИ ОСТЕКЛОВАНИЯ

Вершинин Д.В., Горский Ю.А., Мельникова Н. В., Евстратов Д.С., Никитин Г.И.  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
г. Санкт-Петербург  
[vershinin.dv@edu.spbstu.ru](mailto:vershinin.dv@edu.spbstu.ru)

В статье представлено описание структуры интеллектуального помощника оператора малогабаритного плавителя, описание его компонентов, взаимосвязей между ними и основных сценариев применения в ходе эксплуатации установки. Разработана суррогатная модель, предсказывающая показания датчиков температур печи.

*Ключевые слова:* высокоактивные отходы, печь остекловывания, компьютерная модель, нейронные сети, машинное обучение, суррогатное моделирование.

### INTELLIGENT ASSISTANT CONCEPT FOR VITRIFICATION FURNACE

Vershinin D.V., Gorskiy Yu. A., Melnikova N.V., Evstratov D.S., Nikitin G.I.  
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg  
[vershinin.dv@edu.spbstu.ru](mailto:vershinin.dv@edu.spbstu.ru)

The article presents a description of the small-size melting furnace intelligent operator assistant structure, a description of its components, the relationships between them and the main application scenarios during operation. A surrogate model has been developed that predicts the readings of furnace temperature sensors.

*Key words:* radioactive waste, vitrification furnace, computational model, neural networks, machine learning, surrogate modeling.

### Введение

Развитие алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения дало возможность использовать огромные объемы данных, генерируемых во время работы промышленных объектов, чтобы выявлять закономерности, автоматизировать производственные процессы, улучшать качество продукции и снижать затраты, способствуя развитию бизнеса.

Твердые и жидкие радиоактивные отходы, получаемые в результате эксплуатации ядерных реакторов, требуют особого способа утилизации. Одной из технологий консервации радиоактивных отходов является остекловывание, т.е. процесс включения радиоактивных отходов в стеклообразующие материалы [1]. Эта технология используется на производстве ФГУП «ПО «Маяк» в промышленном масштабе с 1987 года [2]. Имобилизация жидких высокорadioактивных отходов происходит в специальных печах (плавителях) прямого электрического нагрева.

Печь остекловывания является сложным технологическим оборудованием, которое нуждается в мониторинге состояния, обнаружении аномалий в ходе работы, а также в интеллектуальной системе помощи принятию решений. Поэтому применение методов машинного обучения, которые показали свою эффективность при решении упомянутых задач [3, 4], оказывается перспективным направлением в ходе разработки и эксплуатации установки.

### Архитектура интеллектуального помощника

Разработанный концепт представляет собой совокупность автоматизированной системы сбора данных (АССД), моделей машинного обучения и взаимосвязей между ними. Совокупность компьютерных мультифизических моделей в составе цифрового двойника (ЦД) установки совместно с АССД служит базисом для создания интеллектуального помощника (ИП). Далее представлено описание предполагаемых моделей ИП и их взаимосвязи.

#### Модель оценки теплового состояния

Назначение модели - по показаниям датчиков температур и токов, установленных в плавителе и собираемых при помощи АССД, проводить оценку распределения температуры в расплаве. Получаемая таким способом информация о тепловом состоянии печи актуальна ввиду невозможности непосредственного доступа в тигель из-за высоких рабочих температур (более 1000 С).

Для данной модели предполагается использование методов суррогатного моделирования, когда по исходным данным (в данном случае ими являются показания АССД) при помощи заранее обученной нейронной сети восстанавливаются поля целевых величин, в данном случае, температур расплава [5].

Кроме того, получаемые величины используются в качестве входных параметров для других составных частей ИП: моделей предиктивного мониторинга, обнаружения аномалий в работе установки, переключения режима работы, расчета ресурса и оценки уровня расплава.

Применение высокопроизводительных вычислительных кластеров (суперкомпьютеров) позволяет проводить большое количество запусков компьютерных моделей с различными конфигурациями входных параметров и создавать специальные наборы данных, с помощью которых проводится обучение моделей ИП. Структурирование данных и расчетных моделей проводится с помощью Цифровых Платформ (ЦП).

#### Модель предиктивного мониторинга

Назначение модели - на основе показаний АССД и задаваемых оператором параметров (например, дозируемая масса отходов, показания токов, предполагаемое время выдержки) предсказать состояние системы (показания датчиков) на фиксированном временном горизонте и выдать рекомендации о необходимости изменения в режиме работы установки.

#### Модель обнаружения аномалий в работе

Назначение модели - отслеживание показаний АССД и выявление отклонений работы печи от нормального режима на раннем этапе. Источником данных для ее обучения служит массив размеченных исторических показаний датчиков, а также набор результатов, полученных из компьютерных и суррогатных моделей плавителя.

#### Модель оценки остаточного ресурса

Назначение модели - исходя из данных по результатам расчетов ресурса основных узлов изделия, проведенных до начала эксплуатации, производить корректировку этого показателя. Основываясь не только на исходной расчетной оценке, но и на поступающих показаниях датчиков печи, данная модель позволит оптимизировать издержки на обслуживание и ремонт оборудования.

Предполагается, что интеллектуальная система поддержки принятия решений будет работать следующим образом:

- система будет получать данные из АССД в режиме реального времени и анализировать их с помощью алгоритмов машинного обучения;
- на основе полученных данных система будет обнаруживать неисправности или отклонения от нормального режима работы печи, а также вероятность возникновения неисправности на определенном горизонте времени;
- система будет восстанавливать поле температуры расплава по косвенным показаниям датчиков в реальном времени;
- система будет предоставлять рекомендации по управлению процессом остекловывания на основе анализа данных и текущих параметрах процесса;
- система будет отслеживать остаточный ресурс основных узлов изделия, и сообщать о необходимости обслуживания оборудования;
- система также будет иметь возможность обучаться на основе опыта работы и постепенно улучшать свои рекомендации и оптимизацию процесса остекловывания.

Для создания ИП необходимо выполнение следующих этапов работ:

- анализ и обработка исходных аналитических и экспериментальных данных о работе установки;
- определение требований к ИП и основных сценариев использования;

- создание набора исходных компьютерных моделей плавителя;
- создание наборов обучающих и тестовых выборок для алгоритмов машинного обучения;
- определение структур нейронных сетей, обучение и тестирование отдельных моделей ИП;
- поэтапное введение взаимосвязей между моделями ИП, а также с системой АССД;
- тестирование и дообучение имеющихся структур ИП;
- развертывание системы ИП на Цифровой Платформе.

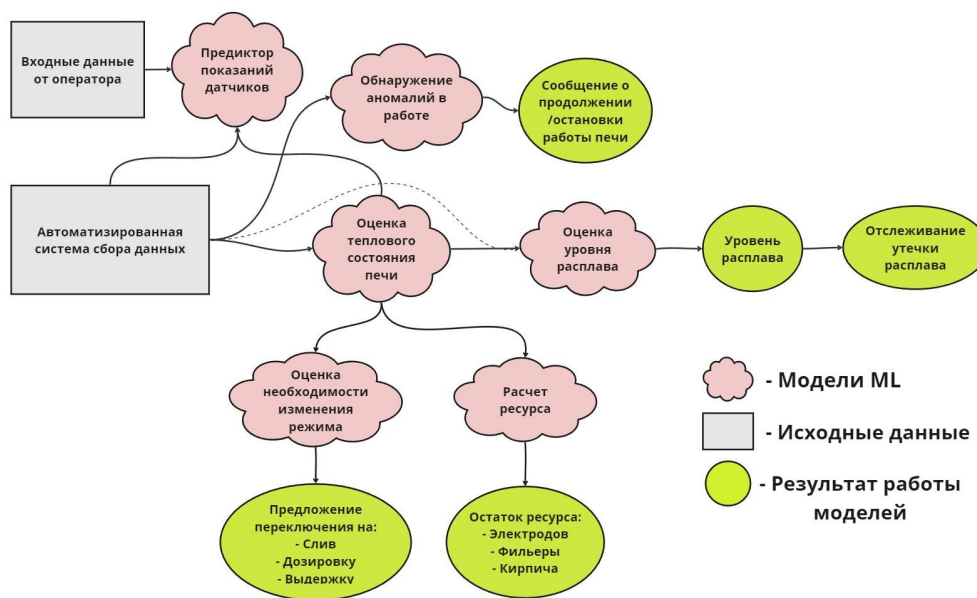


Рис. 1 Схема структуры интеллектуального помощника

### Суррогатная модель печи

В ходе начального этапа по разработке системы интеллектуального помощника, была создана суррогатная модель, способная предсказывать показания двух датчиков температуры установки в области тигля на стационарном режиме выдержки расплава исходя из заданных параметров тока на электродах нагрева.

Для создания суррогатной модели необходимо создать набор обучающих примеров, определив перед этим область, которой принадлежат параметры рассматриваемой системы. В результате анализа исходных данных о работе печи на режиме выдержки расплава, были определены рабочие диапазоны токов.

По итогу запусков модели печи для оценки теплового состояния был создан набор данных из 100 экспериментов для обучения суррогатной модели. Каждая запись представляет собой набор из 5 значений: 3 значения тока на электродах и 2 значения ожидаемых показаний датчиков температуры в печи.

Полученные данные были использованы для обучений полносвязной глубокой нейросети, которая состояла из 5 слоев и 4132 обучаемых параметров.



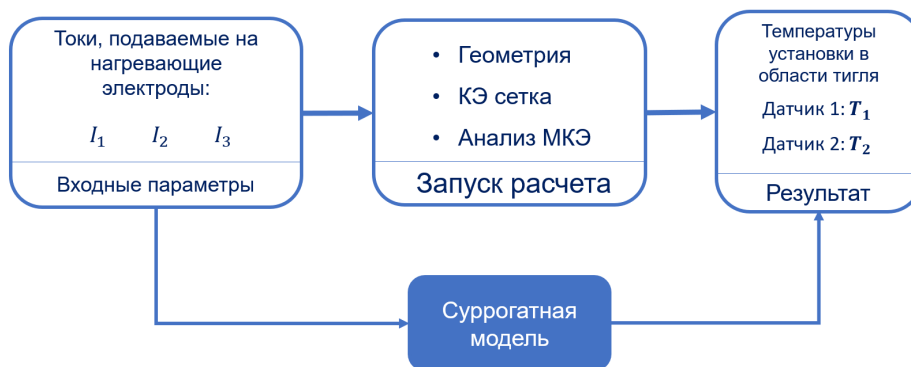


Рис. 2 Схема потока данных для компьютерной и суррогатной моделей

Разработка компьютерной модели проводилась для установившихся параметров печи. На рисунке 3 представлен пример разметки данных, полученных с температурных датчиков при эксплуатации печи остекловывания, и временные промежутки, выбранные для исследования теплового состояния печи с помощью компьютерной модели.

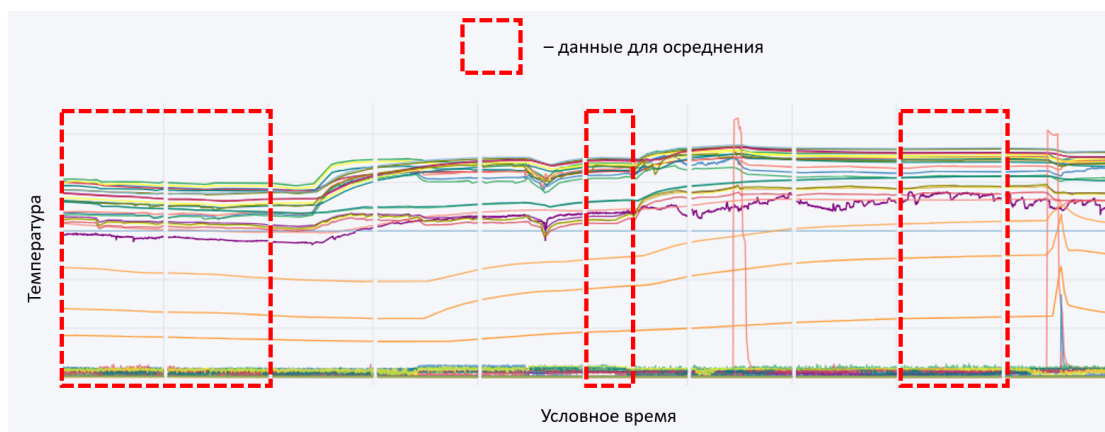


Рис. 3 Данные показаний датчиков температуры печи

Ниже представлены данные о валидации разработанной суррогатной модели. Каждому тестовому эксперименту соответствует свой набор значений токов на электродах. Проведено сравнение данных, полученных из исходной компьютерной модели, суррогатной, а также данных натуральных испытаний плавителя. Результаты сравнения представлены в виде гистограмм на рисунках 4 и 5.



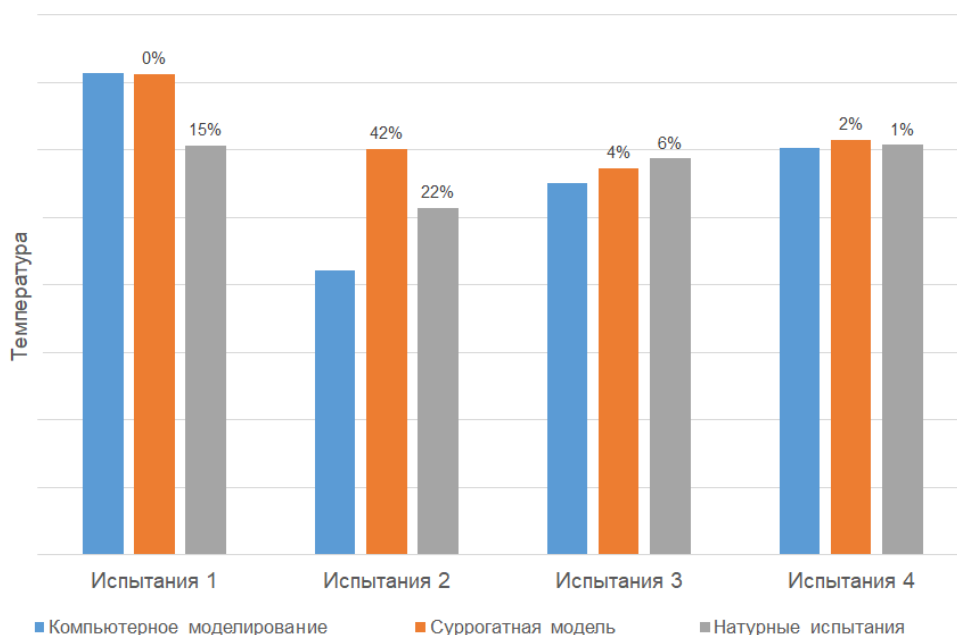


Рис. 4 Сравнение показания температуры датчика 1 для компьютерной модели, суррогатной модели и натуральных испытаний

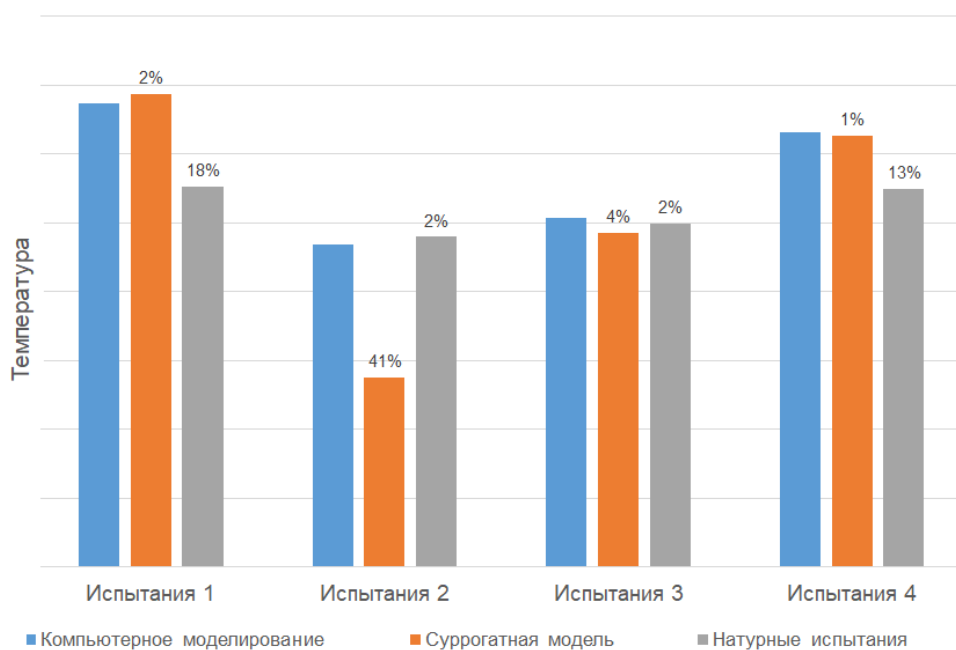


Рис. 5 Сравнение показания температуры датчика 2 для компьютерной модели, суррогатной модели и натуральных испытаний

По итогам проведенного сравнения компьютерной и суррогатной модели можно сделать вывод о хорошем совпадении показаний датчиков из суррогатной модели, а также результатов компьютерного моделирования с натурными испытаниями печи. Максимальное расхождение компьютерной модели и суррогатной равно 42% и наблюдается при сравнении данных при испытаниях 2. Это объясняется тем, что входные параметры для данного эксперимента оказались за пределами рабочего диапазона, на котором происходило обучение нейронной сети. В таких случаях для получения более достоверных результатов необходимо проводить активное обучение суррогатной модели и расширять область рассматриваемых комбинаций параметров. Для других случаев, при которых входные параметры принадлежали обучающей области, максимальное отклонение составило 4%.

Основное преимущество такого подхода состоит в существенном сокращении вычислительных затрат при последующем проведении виртуальных испытаний установки с целью подобрать оптимальные значения токов для режима выдержки при работе плавителя. Кроме того, разработанная модель будет использована в ходе дальнейшей разработке интеллектуального помощника оператора печи остекловывания для оценки ее теплового состояния, предиктивного анализа и предоставления рекомендаций для оператора при эксплуатации.

### **Заключение**

Разработанная концепция интеллектуального помощника предлагает подход к применению методов машинного обучения для решения широкого спектра проблем при эксплуатации сложных промышленных изделий, к которым относится рассматриваемая печь остекловывания: обнаружение аномалий в ходе работы, предиктивный мониторинг показателей, оценка состояния по косвенным показаниям, оптимизация целевых показателей методами суррогатного моделирования.

Созданная на начальном этапе разработки ИП суррогатная модель доказала перспективность и принципиальную возможность использования подхода.

### *Использованные источники:*

1. Сорокин В. Т., Павлов Д. И., Кашеев В. А., Мусатов Н. Д., Баринов А. С. Научные и проектные аспекты остекловывания жидких радиоактивных отходов АЭС с ВВЭР-1200 // Радиоактивные отходы. - 2020. - №2 (11). - С. 56-65.
2. Шайдуллин С. М., Ремизов М. Б., Козлов П. В., Мелентьев А. Б., Вербицкий К. В., Бендасов Д. И., Ребрин М. А. Новый эвакуируемый малогабаритный плавитель с донным сливом дизайна ФГУП «ПО «МАЯК» для отверждения ВАО в боросиликатное стекло // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». - 2021. - №10 (2). - С. 183-190.
3. Кацер Ю.Д. Опыт проектов с ИИ в промышленности на примере проекта по обеспечению контроля технического состояния электролизеров / Кацер Ю.Д. [Электронный ресурс] // [habr.com](https://habr.com) : [сайт]. — URL: <https://habr.com/ru/companies/rosatom/articles/686864/> (дата обращения: 02.08.2023).
4. Котиков А.Ю. Прогнозирование концентрации алюминия в ванне горячего оцинкования / Котиков А.Ю. [Электронный ресурс] // [cnews.ru](https://cnews.ru): [сайт]. — URL: [https://filearchive.cnews.ru/img/files/2022/11/24/5\\_aleksandr\\_kotikov\\_nlmc.pdf](https://filearchive.cnews.ru/img/files/2022/11/24/5_aleksandr_kotikov_nlmc.pdf) (дата обращения: 02.08.2023).
5. Reduced Order Modeling: сайт. – URL : <https://www.mathworks.com/discovery/reduced-order-modeling.html> (дата обращения: 01.12.2023)

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

Исупова А. А.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», Снежинск, Челябинская обл.

[\\*a.a.isupova@vniitf.ru](mailto:a.a.isupova@vniitf.ru)

В докладе представлен обзор метода глубокого обучения с учителем Physics-Informed Neural Networks (PINNs) [1], в котором дополнительно в функцию потерь закладываются дифференциальные уравнения в частных производных.

*Ключевые слова: нейронные сети, PINNs, дифференциальные уравнения в частных производных, уравнение переноса.*

## THE APPLICATION OF DEEP LEARNING METHOD TO SOLVE PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS

Isupova A. A.

FSUE RFYATS-VNIITF named after Academician E.I.Zababakhina", Snezhinsk, Chelyabinsk region .

[\\*a.a.isupova@vniitf.ru](mailto:a.a.isupova@vniitf.ru)

The report presents an overview of the deep learning method called Physics-Informed Neural Networks which encode Partial Differential Equations as a component of the neural network itself .

*Key words: neural networks, PINNs, partial differential equations, transfer equation.*

### Введение

Искусственные нейронные сети сегодня являются важным инструментом для обработки данных, распознавания объектов и решения различных задач в сфере искусственного интеллекта. Однако, в поисках улучшения и расширения функциональности нейронных сетей, исследователи и инженеры разрабатывают новые концепции и подходы.

Одной из таких перспективных областей развития являются методы глубокого обучения, которые в английской литературе получили название Physics-Informed Neural Networks (PINNs) [1] – это научный метод машинного обучения, используемый для решения прямых и обратных задач, связанных с интегрированием физических уравнений для описания поведения системы. Представленный метод позволяет учесть физические законы, свойства и ограничения при обработке данных и принятии решений.

### Структура PINNs

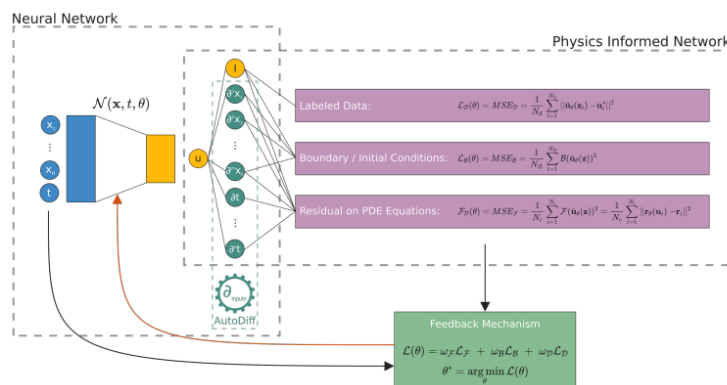


Рис. 1 – Структура PINNs [2]

PINNs могут решать нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, записанные в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + L(u) = 0; (x, t) \in \Omega \times [0, T] \\ u(x, t) = g(x, t); (x, t) \in \partial\Omega \times [0, T] \\ u(x, 0) = h(x); x \in \Omega \end{cases} \quad (1)$$

где  $(x, t)$  – вектор пространственно-временных координат,  $u(x, t)$  – искомое решение,  $L$  – нелинейный дифференциальный оператор.

Для того, чтобы решить уравнение (1) при помощи PINNs, строится нейронная сеть  $\mathbf{u}(x, t, \theta)$ , где  $\theta$  – это веса нейронной сети,  $(x, t)$  – это входные параметры сети и  $\mathbf{u} = [u_1(x, t), \dots, u_n(x, t)]$  – это выходные параметры сети. Структура PINNs представлена на рисунке 1 [2].

Алгоритм PINNs включает в себя следующие шаги:

1. Определение области  $\Omega$ , в которой будет решаться поставленная задача;
2. Инициализация глубокой нейронной сети и ее весов. Количество слоев, нейронов в каждом слое, а также функция активации для каждого слоя задается исследователем;
3. Выбор произвольных точек  $(x, t)$  из области  $\Omega$ ;
4. Запись функции потерь согласно формуле (2);
5. Обновление весов модели с использованием стохастического градиентного спуска.

Суть метода PINNs сводится к аппроксимации дифференциального уравнения путем минимизации функции потерь, зависящей от дифференциального уравнения  $L_f$ , граничных  $L_{BC}$  и начальных  $L_{IC}$  условий. Описанный выше алгоритм повторяется заданное количество раз (эпох).

$$\theta = \operatorname{argmin} (L_f(\theta) + L_{BC}(\theta) + L_{IC}(\theta)); L_{BC}(\theta) = \frac{1}{N_{BC}} \|\mathbf{u}(x, t, \theta) - g(x, t)\|_{\partial\Omega \times [0, T]}^2 \quad (2)$$

$$L_f(\theta) = \frac{1}{N_f} \left\| \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}(x, t, \theta) + L(\mathbf{u}(x, t, \theta)) \right\|_{\Omega \times [0, T]}^2; L_{IC}(\theta) = \frac{1}{N_{IC}} \|\mathbf{u}(x, 0, \theta) - h(x)\|_{\Omega}^2$$

### Применение PINNs для решения дифференциальных уравнений

Решим уравнение переноса с помощью алгоритма PINNs. Область решения задачи  $x \in [-1, 3\pi], t \in [0, 2]$ . Нейронная сеть имеет 8 слоев. На каждый скрытый слой приходится по 20 нейронов. В качестве функции активации выбран гиперболический тангенс. Обучение производилось в течение 10000 эпох с использованием метода оптимизации Адам со скоростью обучения  $10^{-3}$ . Начальное распределение плотности показано на рисунке 2а, а конечное распределение – на рисунке 2б. Для количественной оценки полученного решения была посчитана погрешность в норме  $L_2$ , которая составила 0,78% для всей области решения  $\Omega$ .

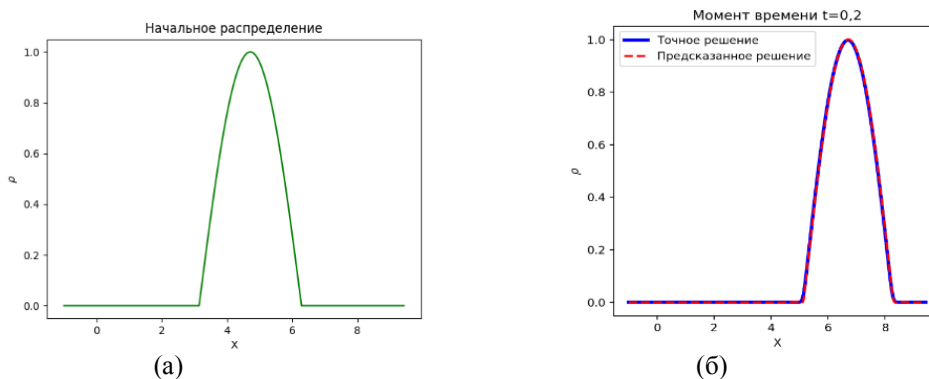


Рис. 2: (а) - Начальное распределение плотности, (б) – Распределение плотности на конечный момент времени

### Заключение

За последние годы исследований PINNs зарекомендовали себя в качестве хорошего инструмента для решения как прямых, так и обратных задач, основанных на дифференциальных уравнениях. В частности, чтобы найти решение прямой задачи, необходимо задать только начальное/ граничное условие, а также само дифференциальное уравнение. Однако, согласно универсальной теореме аппроксимации [3], искусственная нейронная сеть прямой связи с одним скрытым слоем может аппроксимировать любую, но только непрерывную функцию многих переменных с любой точностью. Работы [4, 5, 6] утверждают, что PINNs дает неудовлетворительные результаты при решении функций, содержащих разрывы. Для устранения этого недостатка были проведены дополнительные модификации алгоритма. В статье [4] для решения задачи Сода [7] о распаде произвольного разрыва авторы используют искусственную вязкость как аддитивную добавку в уравнения Эйлера для уменьшения осцилляций вблизи разрыва. Предложенное решение сглаживает осцилляции, но при этом, в некоторой степени, нарушает законы сохранения. К тому же, добавление искусственной вязкости приводит к большим вычислительным затратам из-за нахождения вторых производных. Поэтому, автор статьи [6] предлагает модификацию алгоритма PINNs, называющегося *Weighted Physics-Informed Neural Networks with Domain Extension (W-PINNs-DE)*, в котором он использует взвешенные параметры в итоговой функции потерь, поскольку слагаемое с начальными условиями уменьшается намного быстрее, чем слагаемое, содержащее дифференциальное уравнение, а также он расширяет интервал пространственных переменных для увеличения количества тренировочных данных, что позволяет уменьшить нефизичные осцилляции. Предложенные модификации позволяют достигнуть погрешности в норме  $L_2$  менее 0,1%, что характеризует PINNs как надежный инструмент для решения систем гиперболических уравнений.

#### *Использованные источники:*

1. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. V.378. 2019. P.: 686-707.
2. Salvatore C., Vincenzo S.D.C., Fabio G., and oth. Scientific Machine Learning through Physics-Informed Neural Networks: Where we are and What's next. *Journal of Scientific Computing* 92 (88). 2022. P.:81–143.
3. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2 (4). 1989. P.:303-314.
4. Michoski C., Milosavljevic M., Oliver T., Hatch D.R. Solving differential equations using deep neural networks. *Neurocomputing*, 399. 2020. P.: 193—212.
5. Patel R.G., Manickam I., Trask N., Wood M.A. Thermodynamically consistent physics-informed neural network for hyperbolic systems. *Journal of Computational Physics*. 449(1). 2021. P. 36.
6. Papados A. Solving Hydrodynamic Shock-Tube Problems Using Weighted Physics-Informed Neural Networks with Domain Extension. *Journal of Applied Mathematics, Applied Statistics, Scientific Computing Program*. 2021.
7. Sod G.A. A survey of several finite difference method for system of nonlinear hyperbolic conservation laws. *Journal of Computational Physics*, 27(1). 1978. P.:1—31.

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Машкин А.Н., Романова А.А., Сивков С.И.

*Технологический институт филиал ФГАОУ ВО «Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Свердловская обл.*

[mashkin2698@mail.ru](mailto:mashkin2698@mail.ru)

В данной статье рассматриваются методы обработки изображений, которые применяются в системах распознавания рукописных и печатных текстов.

*Ключевые слова: обзор методов обработки изображений, морфологические методы анализа изображений, метод семантической сегментации.*

## OVERVIEW OF MODERN IMAGE PROCESSING METHODS

Mashkin A.N., Romanova A.A., Sivkov S.I.

*Institute of Technology branch of the Federal State Educational Institution of Higher Education "National Research Nuclear University MEPHI", Sverdlovsk region.*

[mashkin2698@mail.ru](mailto:mashkin2698@mail.ru)

Abstract: The article describes a variety of methods for recognizing images that are used in handwritten and printed text recognition systems.

*Keywords: image processing, image recognition, image morphological methods, image segmentation.*

### Введение

Распознавание и обработка изображений является одним из наиболее перспективных направлений исследований и практического применения. Особенно выделяются такие преобразования над изображениями как операции по выделению краев, нахождение и распознавание конкретного символа, уменьшение или увеличение контрастности, геометрическое преобразование изображения, устранение шумов.

Стандартные методы анализа изображений заключаются в применении к ним преобразований, известных в математике или специально разработанных для некоторых задач. Результатом этих операций является некоторая система знаков.

Методы обработки изображений могут быть самыми разными в зависимости от того, каким образом изображения были получены – синтезированы с помощью компьютерной графической системы или, например, путем оцифровки черно-белых или цветных изображений. Для решения задачи распознавания содержания изображения используется методы морфологического анализа, способствующие созданию подходящего математического описания, придающего его содержание и смысл.

Морфологические методы анализа изображений основаны на математических моделях и изображениях, связывающих их с условиями регистрации. Центральным понятием морфологических методов анализа изображений является понятие формы изображения, под которым понимается часть информации, сохраняемой при варьировании условий создания изображения [3]. Задача формирования формы изображения (свободного объекта, освещаемого конечным числом источников света произвольной интенсивности) является важной частью морфологического анализа. От того, насколько качественно создана форма, зависит результат решения задачи морфологического анализа. Морфологический анализ изображений сообщает об объекте и его изображении.

На практике широко используются морфологические методы:

- морфологическое подавление случайного шума;



- выделение неизвестного объекта на фоне, форма изображения которого известна;
- аппроксимация формы изображения текстурными символами;
- сжатие изображения;
- классификация изображений путем оценки параметров системы регистрации;
- цветовая сегментация на основе морфологического фильтра.

Примерами современных морфологических алгоритмов являются различные методы, такие как детекторы признаков (features detection) и описание (features description), нейронные сети, методы машинного обучения и др. Для этого используются алгоритмы, такие как SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speeded-Up Robust Features) и ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), которые позволяют выделить уникальные особенности на изображении и описать их в виде векторов признаков. Выделяют сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN) и глубокие нейронные сети (Deep Neural Networks, DNN). Они позволяют обрабатывать изображения на высоком уровне абстракции и выделять наиболее важные признаки. Для улучшения результатов обработки изображений используют также методы обучения с подкреплением (Reinforcement Learning), которые позволяют обучать алгоритмы выбирать оптимальные действия в зависимости от текущего состояния окружающей среды.

Обзор методов сегментации. Цель сегментации — упростить или изменить представление изображения, чтобы его было легче анализировать в будущем. Результатом сегментации является множество сегментов, охватывающих все видео. Другими словами, каждый пиксель помечен некоторой меткой класса. Сегментация обычно используется не сама по себе, а как часть какой-либо системы (например, системы машинного зрения), с практической точки зрения о качестве работы метода судят по производительности всей системы. Следовательно, один и тот же метод сегментации может быть хорош для одной задачи и плох для другой. Различные методы сегментации ориентированы на разные свойства сегментации (однородность регионов (однородность цвета или текстуры), допуск соседних регионов, гладкость границ регионов и т. д.). Методы сегментации делятся на два больших класса: автоматические и интерактивные. Автоматические методы сегментации видео не очень хорошо различают нужные объекты. Интерактивные методы сегментации позволяют четко различать объекты интереса. Для этого используются различные алгоритмы, такие как k-means, watershed и region growing.

Границей или контуром на изображении называется набор его пикселей, вблизи которых происходит резкое изменение яркости. Поскольку при цифровой обработке изображение представляется как функция целочисленных аргументов, контуры представляются линиями шириной не менее одного пикселя. Методы обнаружения границ хорошо разработаны для полутоновых изображений. Полутоновое видео рассматривается как функция двух переменных и предполагается, что границы областей соответствуют максимуму градиента этой функции. Для их поиска используется аппарат дифференциальной геометрии (обычно Робертса, Собела, Кирша, фильтры Уоллеса) [4].

Методы семантической сегментации. Семантический анализ — это вершина иерархического процесса обработки изображений. В контексте семантической классификации - алгоритмы адаптации изображений, алгоритмы нечеткой метрической классификации видеофрагментов, информационная оценка системы первичных символов и алгоритмы формирования сложных вторичных символов, нечеткие алгоритмы иерархической классификации изображений на основе результатов сегментной классификации. очень важны [5]. По сути, содержание видео может быть надежно и легко решено людьми при решении задач распознавания. Распознавание — это отнесение конкретной реализации к одному из фиксированного списка классов по определенному решающему правилу, к предложенным значениям ее атрибутов.

Среди методов обнаружения границ с использованием различных дифференциальных методов сегодня широко используются следующие операторы: Робертса, Собела, Кэнни [6].

### **Заключение**

На сегодняшний день существует достаточное количество методов для решения определенных задач, но у всех у них имеется одна особенность: качество исходного изображения. Данная характеристика зависит от таких параметров как качество камеры, её характеристики, освещенность, фон, ориентация изображения. Все перечисленные параметры играют важную роль и от них зависит, какие методы удобнее и легче применять.

#### *Использованные источники:*

1. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. Москва: Техносфера, 2006. - 616 с.
2. Дорогов А. Ю. Быстродействующий алгоритм семантической классификации JPEG-изображений. -Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (СПбГЭТУ) "ЛЭТИ", 2006.
3. Пытьев Ю.П., Чуликов А.И. Методы морфологического анализа изображений. –Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 336 с.
4. Жук С.В. Обзор современных методов сегментации растровых изображений –Известия ВолГТУ. –2009, N 6. С. 115-118.
5. Мухаметжанова Б., Исаков К., Олейникова, А. Цифровые методы обработки и распознавания изображений. Вестник КазАТК, 2016. 117(2). С. 69–76. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2021-117-2-69-76>
6. Ревякин А. М., Скурнович А. В. Подходы к разработке системы распознавания для решения задачи определения контента цифровых изображений // Вестник евразийской науки. 2016. №4 (35).

## АНАЛИЗ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ И МЕТОДОВ СКАНИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Машкин А.Н., Романова А.А., Сивков С.И.

*Технологический институт филиал ФГАОУ ВО «Национального исследовательского  
ядерного университета МИФИ», Свердловская обл.*

[mashkin2698@mail.ru](mailto:mashkin2698@mail.ru)

**Аннотация:** статья посвящена анализу процессу оцифровки бумажного архива конструкторской документации на предприятии с использованием мобильного телефона. Построены сетевые графики на основе которых рассчитаны временные затраты. Представленный анализ методов позволяет проанализировать и выбрать наименее трудо затратный и время затратный метод оцифровки конструкторской документации на предприятии в разрезе одного календарного года.

*Ключевые слова:* сетевой график, расчет и анализ продолжительности сканирования КД, цифровизация, оцифровка.

## ANALYSIS OF THE DURATION AND METHODS OF SCANNING DESIGN DOCUMENTATION AT THE ENTERPRISE

Mashkin A.N., Romanova A.A., Sivkov S.I.

*Institute of Technology branch of the Federal State Educational Institution of Higher  
Education "National Research Nuclear University MEPhI", Sverdlovsk region.*

[mashkin2698@mail.ru](mailto:mashkin2698@mail.ru)

**Abstract:** The article is devoted to the analysis of the digitization process of the paper archive of design documentation at the enterprise using a mobile phone. Network graphs have been built, on the basis of which time costs are calculated. The presented analysis of the methods makes it possible to analyze and select the least time-consuming and time-consuming method of digitizing design documentation at an enterprise in the context of one calendar year.

*Keywords:* network graph, calculation and analysis of the duration of CD scanning, digitalization, digitization

### **Введение**

Современная реальность диктует новые условия для рынка. В первую очередь это связано со стремительным переходом всех областей деятельности человека в цифровое пространство. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, документы в цифровом виде значительно проще разрабатывать, модифицировать и хранить, во-вторых, обмен данными в цифровой среде значительно упрощает и ускоряет сам процесс работы и в-третьих, такой способ хранения значительно повышает сохранность и помогает упростить процедуру разграничения прав доступа к документации.

На сегодняшний день на предприятиях в различных отраслях деятельности довольно сложно встретить полностью «бумажный» цикл работ. Поэтому на многих предприятиях, существует огромное количество бумажных архивов. Чаще всего, подобные архивы накапливались годами и по-прежнему представляют коммерческую ценность для предприятий и организаций (т.к. могут относиться к секретным или конфиденциальным сведениям, являться объектом исключительного авторского права и пр.). Именно поэтому остро встает вопрос оцифровки документов подобного рода с высокой скоростью и наименьшей трудо затратностью. Цифровой образ бумажного документа позволит сохранить его на долгое время в более компактном виде, пригодном для дальнейшей работы [1].

Стоит отметить, что самым популярным способом создания электронного образа конструкторских документов является их сканирование при помощи сканеров различного типа. Если раньше, чтобы отсканировать документы, нужно было приобрести сканер, то теперь это можно сделать при помощи смартфона, фотоаппарата и других средств. Качество сканирования и распознавания текста такими устройствами значительно выросли за последние несколько лет.

**Расчёт и анализ продолжительности сканирования КД на предприятии с использованием мобильного телефона.**

Рассмотрим пример расчета и анализа последовательного сканирования архива конструкторской документации с использованием мобильного телефона.

Пусть мы имеем архив 20 страниц  $n=20$ , технологический процесс состоит из  $m=6$  операций, продолжительность выполнения которых составляет [3].

$t_1=0.25, t_2=0,5, t_3=0,1, t_4=0,25, t_5=3$  мин.

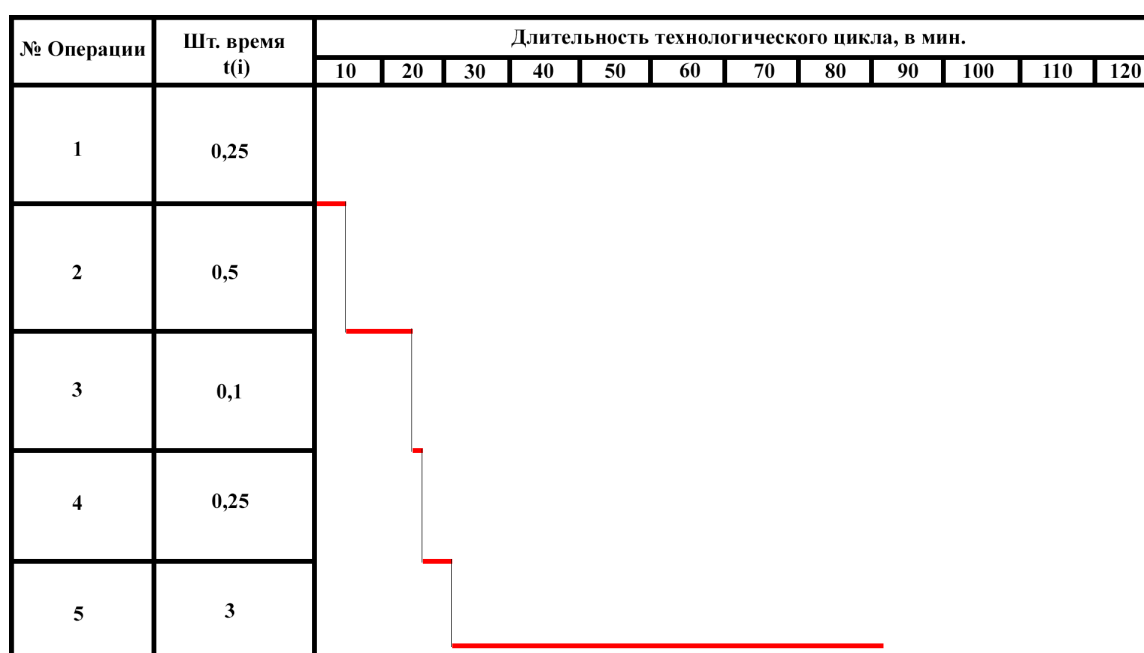
Где:

$t_1$  – Проверка состояния документа

$t_2$  – Позиционирование документа на подготовленной области

$t_3$  – Нажатие кнопки для снимка

$t_4$  – Импорт снятого изображения на ПК



$t_5$  –

Обработка полученной фотографии

Время межоперационных перерывов  $t_{mo}=0.5$  мин., время естественных процессов  $T=15$  мин. Все операции выполняются соответственно на одном рабочем месте.

Продолжительность цикла сканирования архива составляет [1].

$$T_{ц(пол)} = 20 \cdot (0,25 + 0,5 + 0,1 + 0,25 + 3) = 82 \text{ мин. (1)}$$

Рис. 1. График технологического цикла при последовательном фотографировании страниц архива по операциям с помощью мобильного телефона.

Общее время внутрипартионного пролёживания одной страницы на всех операциях составляет:

$$t_{пр} = 82 - 7,5 = 77,9 \text{ мин. (2)}$$

Общее время пролѣживания всех страниц в архиве (для определения величины незавершенного сканирования) составляет:

$$T_{пр} = n \cdot t_{пр} = 20 \cdot 109,25 = 1558 \text{ мин. (3)}$$

Следует отметить, что использование мобильного телефона позволяет достаточно быстро и удобно производить оцифровку КД. Современные камеры смартфонов обеспечивают качественный скан практически без потерь качества. Так же следует отметить, что перенос изображений возможно реализовать автоматически с телефона на ПК [2].

Проанализировав сканирование архива с использованием мобильного телефона, стоит отметить, что время, которое тратится на оцифровку гораздо меньше, чем с использованием сканеров.

### Результаты сканирования архива

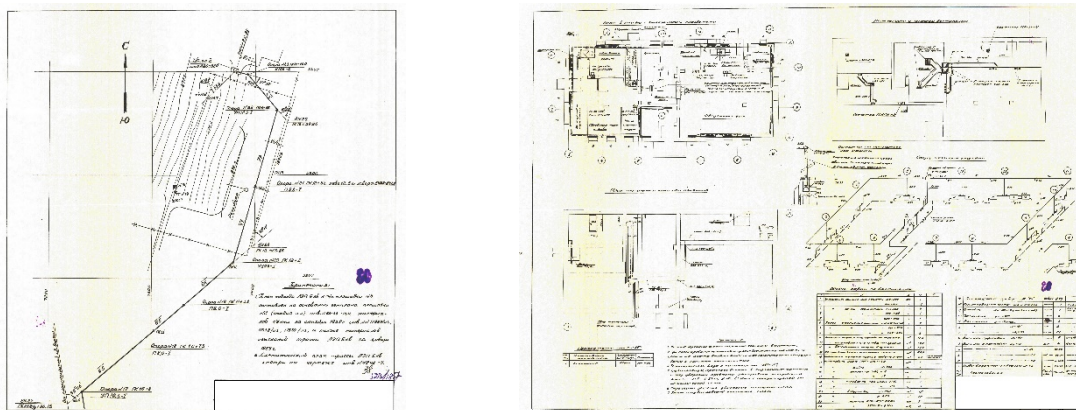


Рис. 2. Результат сканирования  
страницы с использованием  
сканера с колыбелью

### Заключение

Таким образом, в статье был произведен усредненный расчет по времени затрат по сканированию конструкторской документации с использованием мобильного телефона. Проанализировав расчѣты, полученные изображения и графики технологических циклов, можно сделать наглядный вывод, что наиболее быстрый метод оцифровки - с помощью мобильного телефона.

Стоит так же отметить, что потеря качества при сканировании с помощью мобильного телефона - минимальна, благодаря современным технологиям в современном мире. Если раньше камеры телефонов оставляли желать лучшего, то на сегодняшний день они ничем не уступают в простых снимках сканерам или фотоаппаратам с большим выбором объективов [4].

### Использованные источники:

1. Джойнсон Используйте все возможности вашей цифровой камеры / Джойнсон, Саймон. - Москва: АСТ, 2021. - 160 с
2. Мосс, Кевин Л. 50 эффективных приемов съемки цифровым фотоаппаратом / Мосс Кевин Л.. - Москва: Вильямс, 2019. - 496 с.
3. Трачун, А.И. Зеркальный фотоаппарат как система / А.И. Трачун. - Москва: Искусство, 2018. - 156 с.
4. Шпунт, Я. Б. Как выбрать сканер, который вам нужен / Я.Б. Шпунт. - Москва: ИЛ, 2023. - 144 с.



## ОБЗОР МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ДЛЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Минаев А.С.<sup>1,2</sup>, Фёдоров В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

[a.s.minaev@vniitf.ru](mailto:a.s.minaev@vniitf.ru)

**Аннотация.** В данной работе анализируется обработка гиперспектральных данных для изучения земной поверхности с упором на методы повышения точности классификации. Используя метод анализа главных компонент и гибридную сверточную архитектуру, исследование подчеркивает эффективность этих подходов, особенно гибридной архитектуры с точностью классификации около 99%, что выделяет потенциал глубокого обучения в области анализа гиперспектральных данных.

**Ключевые слова.** Гиперспектральные данные, анализ главных компонент, метод опорных векторов, гибридная сверточная архитектура.

## AN OVERVIEW OF SEGMENTATION METHODS FOR HYPERSPECTRAL EARTH REMOTE SENSING DATA BASED ON DEEP LEARNING TECHNOLOGY

Minaev A.S.<sup>1,2</sup>, Fedorov V.V.<sup>1,2</sup>

*IFGUP RFYATS-VNIITF named after Academician E.I.Zababakhina", Snezhinsk,  
Chelyabinsk region. 2FGAOU VO Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National  
Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region .*

[a.s.minaev@vniitf.ru](mailto:a.s.minaev@vniitf.ru)

**Annotation.** In this work, the processing of hyperspectral data for studying the Earth's surface is analyzed, with a focus on methods to enhance classification accuracy. Using the principal component analysis method and a hybrid convolutional architecture, the study highlights the effectiveness of these approaches, especially the hybrid architecture with a classification accuracy of about 99%, underscoring the potential of deep learning in the field of hyperspectral data analysis.

**Keywords.** Hyperspectral data, principal component analysis, support vector machine method, hybrid convolutional architecture.

Гиперспектральные данные дистанционного зондирования Земли представляют собой информацию, полученную с помощью специализированных инструментов, которые фиксируют изображения поверхности Земли в широком диапазоне электромагнитного спектра. В отличие от традиционных методов, где изображения снимаются в нескольких спектральных диапазонах (например, в видимом, инфракрасном), гиперспектральные камеры фиксируют данные в сотнях или даже тысячах узких спектральных полос. Это позволяет получать изображения с очень высокой спектральной разрешающей способностью. Однако обработка этих данных из-за их высокого объема и сложности требует продвинутых методов анализа.

Значимость гиперспектральных данных заключается в их способности обеспечить более детальное и точное представление о состоянии объектов на поверхности Земли. В сельском хозяйстве эти данные могут оптимизировать урожайность и контролировать состояние сельскохозяйственных культур. В области геологических исследований они могут использоваться для обнаружения различных минералов и ресурсов, а также для отслеживания геологических изменений. В городском планировании и управлении могут помочь в анализе землепользования, планировании городской инфраструктуры и мониторинге экологической обстановки в городских районах.



Исследование гиперспектральных данных выполним на открытом наборе данных, полученных датчиком AVIRIS над долиной Салинас-Вэлли штата Калифорния, США. Набор данных содержит изображения с пространственными размерами 512x217 пикселей и 224 спектральными полосами в диапазоне значений длин волн 360...2500 нм, которые включают в себя спектральные отклики различных сельскохозяйственных культур и их состояния.

В обработке гиперспектральных данных используется техника снижения размерности, которая эффективно уменьшает объем данных, при этом сохраняя их важные аспекты. В этом контексте широко применяется метод анализа главных компонент (АГК) [1]. АГК трансформирует исходные данные в новое пространство переменных, называемых главными компонентами, которые представляют собой линейные комбинации исходных спектральных полос. Эти компоненты упорядочены таким образом, что первые компоненты содержат наибольшее количество исходной варибельности данных. Использование АГК в гиперспектральных данных позволяет выделить наиболее значимые спектральные особенности, что облегчает дальнейшую классификацию и анализ. Проанализируем дисперсию, объясняемую главными компонентами на Рисунке 1. Один только первый главный компонент охватывает более 65% дисперсии. Первые два компонента охватывают примерно 94% дисперсии. Дисперсия начинает выравниваться около 15-го компонента, при этом вклад каждого дополнительного компонента становится менее значительным. Исходя из результатов работы АГК, набор данных был сокращен до 15 главных компонент.

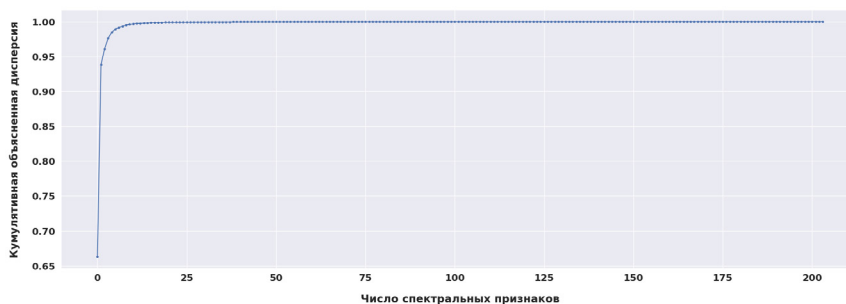


Рисунок 1. График кумулятивной объясненной дисперсии

После снижения размерности данных следующим шагом является применение различных методов классификации. Один из эффективных традиционных линейных методов в этом контексте - метод опорных векторов (SVM) [2]. SVM может быть использован для сегментации изображений путем классификации каждого пикселя в соответствующий класс. Это может включать различение разных типов земного покрытия, таких как вода, растительность, почва и другие. SVM обрабатывает каждый пиксель как отдельный вектор в пространстве признаков, исходя из его спектрального профиля, и определяет, к какому сегменту или классу он принадлежит. Благодаря применению функций ядра, SVM способен моделировать сложные нелинейные отношения, что улучшает точность классификации.

Для анализа данного метода исследуемые данные были случайным образом разделены на обучающую и тестовую выборки, при этом для тестовой выборки было выделено 80% данных. Обучение производилось классификатором с радиально-базисной функцией. Оценка качества модели включала вычисление таких метрик как общая точность, точность по классам, полнота и F1-оценка. Общая точность классификации составила приблизительно 89%. Также была создана матрица ошибок, представленная на Рисунке 2, которая дала детальное представление о качестве модели по отдельным классам.

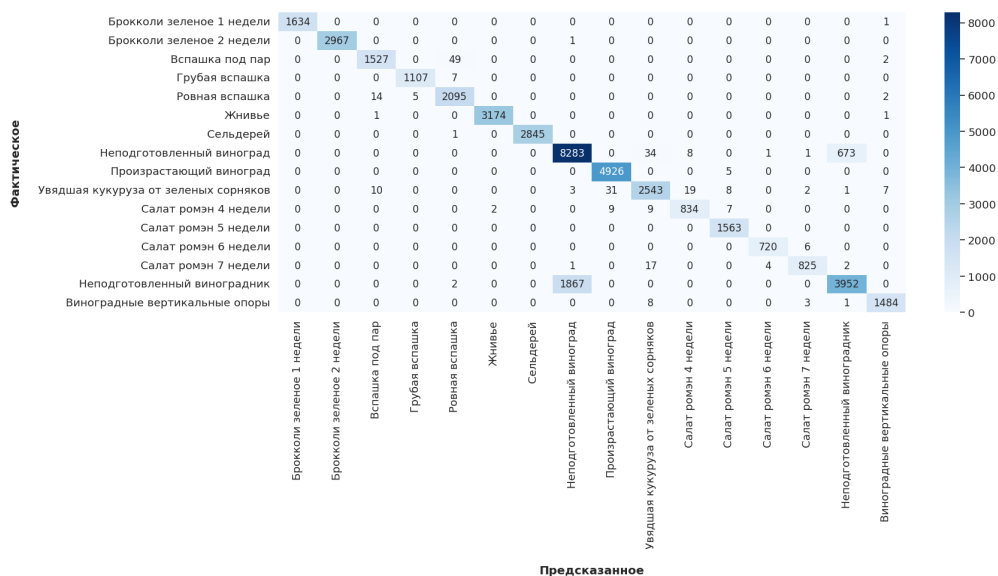


Рисунок 2. Матрица ошибок для модели SVM

Далее перейдем к рассмотрению инновационной технологии в области обработки гиперспектральных данных – HybridSN [3]. В рамках исследования была разработана гибридная архитектура, сочетающая в себе как 3D, так и 2D сверточные слои. Она начинается с 3D-сверток для обработки пространственно-временных данных (что идеально подходит для гиперспектральных изображений или видеоданных), за которыми следует слой изменения формы для преобразования 3D-объектов в 2D. Затем это обрабатывается 2D-сверточным слоем, подходящим для извлечения признаков изображения. Сеть заканчивается плотными (полносвязными) слоями, обычно используемыми для задач классификации. Эта архитектура хорошо подходит для задач, требующих понимания как пространственных, так и временных особенностей данных.

Для преобразования исследуемых данных в формат, подходящий для обучения сверточной нейронной сети, создаются изображения-кубы, которые представляют небольшие трехмерные сегменты исходных данных. Каждый куб соответствует малой области исходного изображения с усеченной АГК спектральной информацией. Данные были случайным образом разделены на обучающую и тестовую выборки, при этом для тестовой выборки было выделено 80% данных, а 30% от обучающей выборки было отделено на создание валидационной выборки. Обучение производилось в течении 10 эпох с помощью метода оптимизации Адама со скоростью обучения  $10^{-3}$  и функцией перекрестной потери энтропии. Для оценки качества модели используются метрики, такие как общая точность, точность по классам, полнота и F1-оценка. Общая точность классификации составила приблизительно 99%. На рисунке 3 представлена матрица ошибок, которая дает детальное представление о качестве модели по отдельным классам.

Результаты исследования демонстрируют высокую точность и эффективность технологий глубокого обучения по сравнению с традиционными методами, что открывает новые перспективы для более точного и детального анализа гиперспектральных данных.

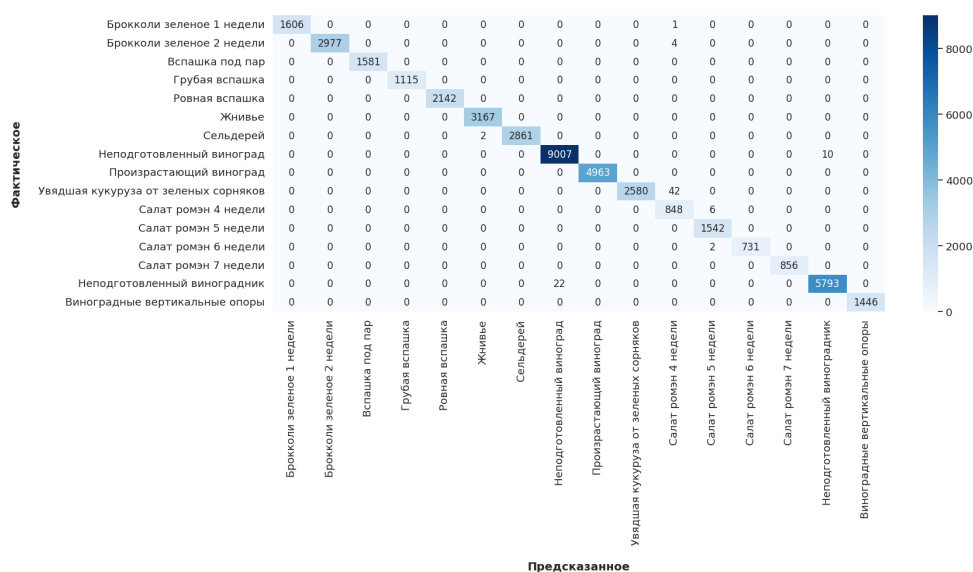


Рисунок 3. Матрица ошибок для гибридной модели

*Использованные источники:*

1. Jolliffe, I.T. Principal Component Analysis / I.T. Jolliffe. — New York: Springer-Verlag, 2002. — 489 p. — Текст: непосредственный.
2. Cortes C. and Vapnik V. Support-vector networks. Machine Learning, 1995, Vol. 20 (3), pp. 273–297. — Текст: непосредственный.
3. Roy S.K., Krishna G., Dubey S.R., et al. HybridSN: exploring 3-D–2-D CNN feature hierarchy for hyperspectral image classification. — Текст: непосредственный // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 277–281.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА СЖАТИЯ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА С СОХРАНЕНИЕМ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ

Михайлов А.Ф.

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[chelaxe@gmail.com](mailto:chelaxe@gmail.com)*

Аннотация. Эффективный мониторинг сложных систем требует обработки значительных объемов данных, что представляет проблему для быстрого анализа и обеспечения отказоустойчивости. В этой работе рассматривается сжатие данных как стратегия для уменьшения генерируемых данных. Предлагается улучшенный алгоритм Swinging Door с автономной настройкой погрешности сжатия. Экспериментальные результаты демонстрируют эффективность подхода, подтверждая его практическую применимость.

*Ключевые слова. SWINGING DOOR, СЖАТИЕ ДАННЫХ, МОНИТОРИНГ, АЛГОРИТМ, РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТЬ.*

### DEVELOPMENT OF A METHOD FOR COMPRESSING MONITORING DATA WHILE MAINTAINING REPRESENTATIVENESS

Mikhailov A.F.

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University  
MEPhI, Chelyabinsk Region*

Annotation. Effective monitoring of complex systems requires the processing of significant amounts of data, which presents a challenge for fast analysis and fault tolerance. This paper considers data compression as a strategy to reduce the generated data. An improved Swinging Door algorithm with autonomous compression error tuning is proposed. Experimental results demonstrate the effectiveness of the approach, confirming its practical applicability.

*Keywords. SWINGING DOOR, DATA COMPRESSION, MONITORING, ALGORITHM, REPRESENTATIVENESS.*

В эпоху глобальной цифровизации, мониторинг систем с использованием информационных технологий становится критически важным, особенно в контексте обработки и анализа массивных данных, генерируемых множественными устройствами. С увеличением данных возникает проблема их хранения и передачи, что актуализирует потребность в эффективном сжатии данных без потери их репрезентативности.

В ответ на эти вызовы, предлагается разработка алгоритма сжатия данных, реализуемого на аппаратном уровне для ускорения обработки данных и снижения нагрузки на вычислительные системы. Основная особенность алгоритма - его поточный характер, позволяющий обрабатывать данные в реальном времени без необходимости временного хранения.

Цель статьи - представить концепцию, разработку и применение этого поточного алгоритма сжатия в мониторинговых системах, с упором на сохранение точности данных и возможности аппаратной интеграции.

В качестве основы был выбран алгоритм Swinging Door («вращающаяся дверь») [2] из-за его эффективности в прореживании данных. Основываясь на механизме "окна" [1] для отслеживания значимых изменений, алгоритм устанавливает диапазон допустимых отклонений ("дверные полотна") вокруг последнего зарегистрированного значения. Запись новых данных происходит только при выходе за эти пределы, обеспечивая экономию объема

данных без значительной потери информации. Это особенно актуально для данных с незначительными или повторяющимися изменениями.

В алгоритме *Swinging Door* были реализованы ключевые модификации для повышения его эффективности. Во-первых, вместо создания новой точки при закрытии "коридора" теперь сохраняется последнее фактическое значение, гарантируя реальную временную метку и значение прореженных данных. Введен параметр продолжительности "коридора", позволяющий автоматически закрывать его после определенного количества пропущенных точек или временного интервала, что улучшает обработку данных с незначительными изменениями.

Погрешность сжатия теперь разделяется на верхнюю и нижнюю границы, обеспечивая более тонкую настройку вокруг среднего значения. Добавлена функция автономной настройки погрешности сжатия, использующая экспоненциальное скользящее среднее и абсолютное значение наклона между последовательными точками [3].

Эти изменения обеспечили возможность реализации алгоритма на аппаратном уровне с использованием микроконтроллера *ATmega328*, значительно расширяя его применение в различных системах мониторинга.

Улучшения алгоритма *Swinging Door* для сжатия данных мониторинга, повысили его эффективность и адаптивность. Значительный вклад внесла функция автономной настройки погрешности.

Аппаратная реализация алгоритма расширяет его применение для эффективного сжатия данных в реальном времени в разнообразных сложных системах. Эти усовершенствования способствуют улучшению функциональности систем мониторинга, сохраняя при этом качество и точность обрабатываемых данных, что является ключевым в современном информационном контексте.

В рамках исследования, направленного на оценку эффективности модифицированного алгоритма сжатия данных, использовался открытый набор данных. Основной задачей тестирования было определение степени сжатия данных при одновременном сохранении их репрезентативности, критически важной для аналитической точности и целостности принятия решений.

Выбранный для тестирования набор данных отличался значительным объемом и разнообразием, что позволило всесторонне оценить производительность алгоритма в различных сценариях. После применения модифицированного алгоритма к этим данным, был проведен анализ полученных результатов.

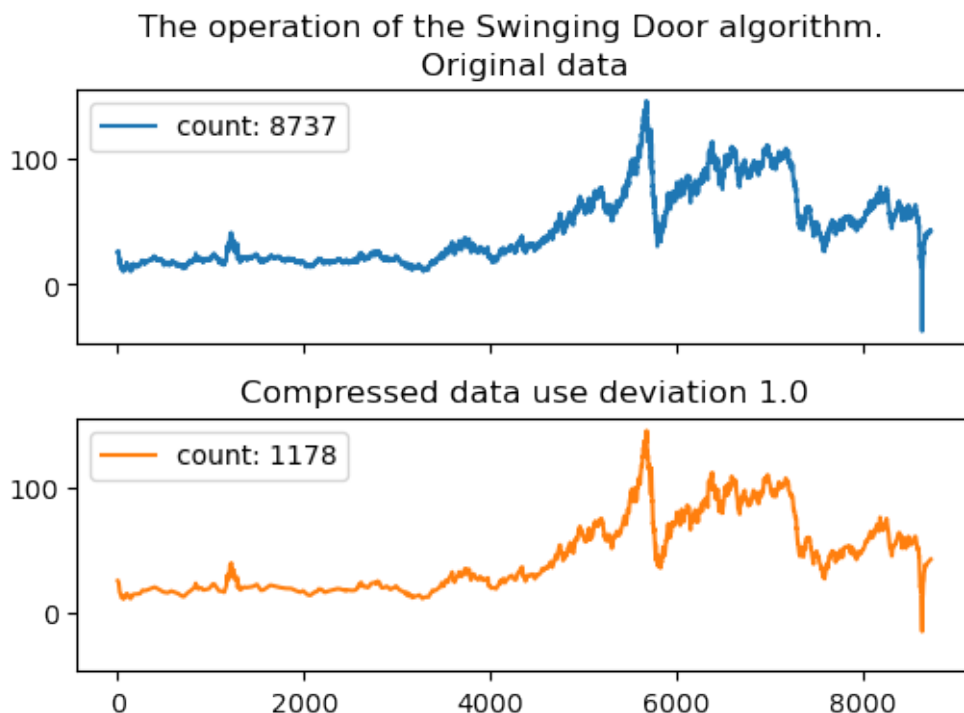


Рисунок 1. Демонстрация работы алгоритма на открытом наборе данных.

Согласно результатам, представленным на Рисунке 1, алгоритм продемонстрировал высокую эффективность, сократив исходный объем данных на 87%. Это подчеркивает его способность к значительному уменьшению объема данных, что особенно важно в контексте ограниченных ресурсов хранения и обработки больших данных. Ключевым моментом является сохранение репрезентативности данных алгоритмом, что подтверждает его пригодность для практического использования в сферах мониторинга и анализа данных.

Таким образом, результаты тестирования на открытом наборе данных эффективно демонстрируют высокую производительность модифицированного алгоритма сжатия данных, подчеркивая его значимость в области обработки и анализа больших объемов данных.

#### *Использованные источники*

1. М.В. Демешко, И.А. Канаева, И.А. Ботыгин. Визуализация метеорологических данных; [Электронный ресурс] - Режим доступа: URL: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/46433/1/conference\\_tpu-2017-C04\\_p249-250.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/46433/1/conference_tpu-2017-C04_p249-250.pdf) (дата обращения: 25.12.2023).
2. Edgar H. Bristol. Data compression for display and storage // Патент США № US4669097A; [Электронный ресурс] - Режим доступа: URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f6/ca/83/c34a2602ede2ac/US4669097.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).
3. Juan David Arias Correa, Alex Sandro Roschildt Pinto, Carlos Montez, Erico Meneses Leão. Swinging Door Trending Compression Algorithm for IoT Environments; [Электронный ресурс] - Режим доступа: URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/fe00/bc1bbea2147c338898a8fa6c31a84afce467.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).



## АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Мякушко Э.В. Сагайдачная П.В. Агеев Г.А.  
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[M4aircraft@yandex.ru](mailto:M4aircraft@yandex.ru)

Рассмотрены основы алгоритма управления по истинному курсу беспилотным летательным аппаратом на основе нечёткой логики.

*Ключевые слова:* линейное боковое отклонение, линия заданного пути, инерциальная навигационная система, беспилотный летательный аппарат, нечеткая импликация

## AUTONOMOUS CONTROL OF A PILOTLESS AIRCRAFT IN THE DIRECTION

Myakushko E. V. Sagaidachnaya P.V. Ageev S.G  
Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI,  
Chelyabinsk region  
[M4aircraft@yandex.ru](mailto:M4aircraft@yandex.ru)

The basics of a true course control algorithm for an unmanned aerial vehicle based on fuzzy logic are considered.

*Keywords:* linear lateral deviation, line of a given path, inertial navigation system, unmanned aerial vehicle, fuzzy implication

Автономное управление является предпочтительным так как не использует в качестве управляющих сигналов сигналы от внешних источников, следовательно, защищено от внешних помех.

Система управления должна включать в себя инерциальную навигационную систему ИНС для определения места положения беспилотного летательного аппарата БПЛА относительно земли. ИНС включает в себя следующие звенья:

1. Датчик ускорений (акселерометр)
2. Интегрирующее звено 1
3. Интегрирующее звено 2
4. Вычислитель

ИНС задействуется при старте БПЛА с земли, либо старте с носителя. При старте с носителя необходимо вносить поправку в управляющий сигнал пропорциональную скорости носителя в интегрирующее звено 2.

ИНС определяет счислением пути отклонение от линии заданного пути ЛЗП-линейное боковое отклонение ЛБУ это значение будем использовать в качестве входной переменной  $X_{вх1}$ . Используя дифференцирующее звено получим скорость изменения ЛБУ как входную переменную  $X_{вх2}$ .

Далее необходимо на заданном универсуме, который соответствует лётно-техническим характеристикам ЛТХ задать нечёткие множества для  $X_{вх1}$ :

- большое ЛБУ влево от ЛЗП (БЛ)
- малое ЛБУ влево от ЛЗП (МЛ)
- ЛБУ от ЛЗП отсутствует (0)
- малое ЛБУ вправо от ЛЗП (МП)
- большое ЛБУ вправо от ЛЗП (БП)

Для  $X_{вх2}$ :

- скорость приближения к ЛЗП (СП)
- скорость отклонения от ЛЗП отсутствует (0 С)
- скорость удаления от ЛЗП (СУ).

Переменные  $X_{вх1}$  и  $X_{вх2}$  участвуют в формировании посылки нечёткой импликации. В качестве заключения необходимо сформировать нечеткие множества управляющего сигнала  $X_{вых}$  на рули направления БПЛА:

- Большой поворот влево (БПЛ)
- Средний поворот влево (СПЛ)
- Малый поворот влево (МПЛ)
- Сигнал на рули поворота отсутствует (0П)
- Большой поворот вправо (БПП)
- Средний поворот вправо (СПП)
- Малый поворот вправо (МПП)

Форму функции принадлежности нечётких множеств необходимо выбрать эмпирическим путем исследуя динамику эволюций при испытательных полетах БПЛА конкретного типа.

Нечеткую импликацию можно отразить в виде таблицы 1:

X <sub>вых</sub>		X <sub>вх1</sub>				
		БЛ	МЛ	0	МП	БП
X <sub>вх2</sub>	СП	БПП	СПП	МПП	0П	МПЛ
	0С	СПП	МПП	0П	МПЛ	СПЛ
	СУ	МПП	0П	МПЛ	СПЛ	БПЛ

Табл. 1. Таблица нечеткого логического вывода

На основании таблицы получаем 15 возможных случаев воздействия на рули направления БПЛА. Один из них:

Если  $X_{вх1}$  (СП) и  $X_{вх2}$  (МЛ), то  $X_{вых}$  (СПП)

Логическая связка И соответствует операциям пересечения над нечеткими множествами: пересечение, алгебраическое пересечение, граничное пересечение, драстическое пересечение.

При формировании управляющего сигнала в зависимости от конкретного значения местоположения БПЛА необходимо учитывать все возможные сочетания входных переменных, которые дадут четыре нечетких импликации. В случае если в заключении получим два одинаковых нечетких множества, то между ними выполняется логическая связка ИЛИ соответствующая операциям нечеткого объединения: объединение, алгебраическое объединение, граничное объединение, драстическое объединение.

Значения функций принадлежности входных переменных получим через функциональное соответствие  $A \subseteq X \times H$ , где  $X$ -множество переменных;  $H$ -множество значений функции принадлежности.

*Использованные источники:*

1. Лебедев М. И. Самолетовождение //Учебное пособие для летчиков и штурманов. – 2003.
2. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление/А. Пегат; пер. с англ.- Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 798с.: ил.- (Адаптивные и интеллектуальные системы)
3. Черный М.А., Кораблин В.И. “Самолетовождение” Издание 2-е переработанное и дополненное, Москва: “Транспорт”, 1977.
4. Воздушная навигация. п-к Волковский В.С. и др. АВВАКУЛ, 1993.

## СЕГМЕНТАЦИЯ ФЛОТАЦИОННОЙ ПЕНЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Пыхов В.В.

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*

*[VVPykhov@mephi.ru](mailto:VVPykhov@mephi.ru)*

О качестве процесса флотации можно судить по размеру и форме пузырьков. Мониторинг и оценка в режиме реального времени позволяют быстро вносить изменения в технологический процесс, тем самым поддерживая неизменно высокий уровень качества.

В статье рассматривается создание специализированного программного обеспечения для оценки размера пузырьков. Описан алгоритм работы программы с учетом специфики поставленной задачи. Представлены результаты работы. Проведена оценка скорости обработки одного кадра. Описаны способы повышения скорости обработки данных. Также определен вектор дальнейшего развития исследований в этой области.

*Ключевые слова: процесс флотации, размеры пузырьков, U-Net, OpenCV, сегментация, контуры пузырьков, Pytorch, Python, видеокамера*

## REAL-TIME SEGMENTATION OF FLOTATION FOAM

Pykhov V.V.

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPHI, Chelyabinsk Region.*

*[VVPykhov@mephi.ru](mailto:VVPykhov@mephi.ru)*

The quality of the flotation process can be judged by the size and shape of the bubbles. Real-time monitoring and evaluation allows you to quickly make changes to the technological process, thereby maintaining a consistently high level of quality.

The article discusses the creation of specialized software for estimating the size of bubbles. The algorithm of the program operation is described, taking into account the specifics of the task. The results of the work are presented. The evaluation of the processing speed of one frame was performed. The ways of increasing the speed of data processing are described. The vector of further development of research in this area has also been determined.

*Keywords: flotation process, bubble sizes, U-Net, OpenCV, segmentation, bubble contours, Pytorch, Python, video camera*

### Введение

О качестве процесса флотации можно судить по размерам и форме пузырьков. Наблюдение и оценка в реальном времени позволят оперативно вносить изменения в технологический процесс, тем самым поддерживая стабильно высокий уровень качества.

В предыдущих исследованиях [1] была доказана эффективность использования нейронной сети U-Net для сегментации изображения пены. Была обучена нейронная сеть для распознавания пузырьков на изображении. Сравнительно простая сеть U-Net со структурой слоев 32, 64, 128, 256, 512 показала весьма хорошие результаты на тестовых изображениях. Благодаря достаточно простой архитектуре данная сеть обеспечивает высокую производительность.

Сегментацию пузырьков флотационной пены необходимо выполнять в реальном времени. При этом кроме непосредственно процесса сегментации, необходимо производить оценку контуров пузырьков.

### Алгоритм анализа видеопотока

Алгоритм программы анализа видеопотока с видеокамеры, установленной во флотационной установке представлен на рисунке 1.

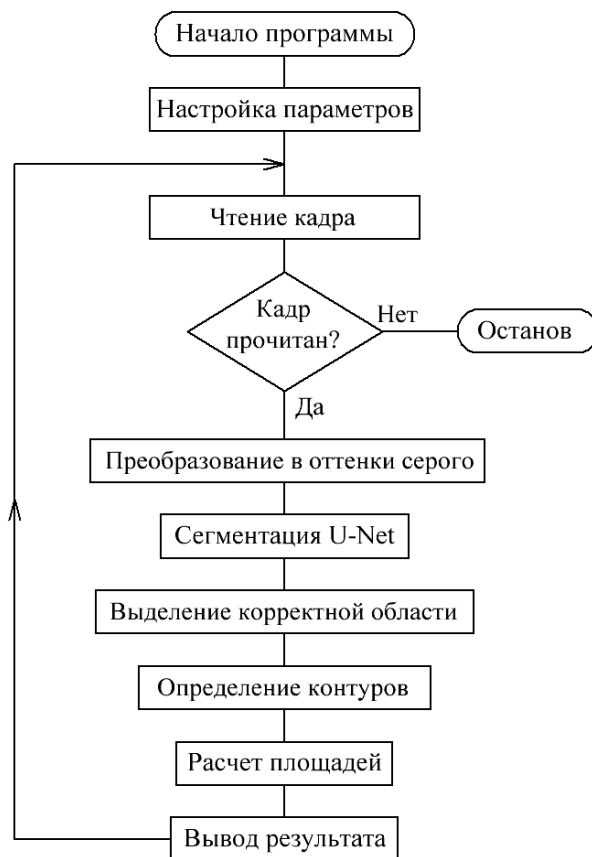


Рисунок 1. Алгоритм анализа видеопотока

Перед началом основного цикла обработки изображения необходимо настроить параметры работы программы. Настраиваются такие параметры, как область анализа, диапазоны распределения площадей пузырьков, основные константы для дальнейших расчетов.

Захват кадра из видеопотока осуществляется стандартными средствами библиотеки OpenCV [2]. Если кадр прочитать не удалось, то выполнение программы останавливается. В случае успеха, полученная картинка передается для дальнейшей обработки.

Используемая нейронная сеть U-Net спроектирована для обработки черно белых изображений. Непосредственно перед процедурой сегментации исходное цветное изображение преобразуется в оттенки серого. Данная процедура так же выполняется стандартными средствами библиотеки OpenCV [3].

В связи с особенностями конструкции и функционирования флотационной установки, не вся область обрабатываемого изображения содержит полезную информацию. Изображение может быть хуже освещено по краям, либо в объектив камеры могут попадать различные плотные отложения, элементы конструкции флотационной камеры. Корректная область изображения может быть меньше требуемой для работы нейронной сети (512 x 512 пикселей), либо иметь не прямоугольную форму. С точки зрения целостности изображения для правильной работы сети U-Net, выделение корректной области целесообразно делать после процедуры сегментации.

Выделенная корректная область используется для поиска контуров, которые по сути являются пузырьками. Определение выполняется стандартными средствами OpenCV [4]. Результатом является массив контуров.

Селекция пузырьков по размерам осуществляется на основе площади соответствующих контуров. Для расчета площадей используются стандартные средства OpenCV. Пузырьки разделяются на категории с шагом изменения в два раза по площади, что соответствует изменению геометрических размеров в  $\sqrt{2}$  раз.

Результатом обработки видеопотока является распределение пузырьков по размерам исходя из занимаемой площади. Процент площади, занимаемый каждой категорией пузырьков, определяется по формуле:

$$L_i = \frac{\sum_{j=0}^{N_i-1} S_{i,j}}{\sum_{n=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N_n-1} S_{n,j}} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $S_{i,j}$  – площадь отдельно взятого контура, относящегося к категории  $i$ ;  $N_i$  – количество контуров, входящих в  $i$  категорию размеров;  $M$  – общее количество категорий.

### Результат работы программы

В качестве входных данных для программы использовалась запись с видеокамеры, расположенной во флотационной установке. На рисунке 2а представлен один из кадров видеопотока из флотационной камеры. На данном изображении отчетливо видны элементы конструкции в виде трубы в которую установлена камера, а также плотный осадок в левом нижнем углу. Наилучшая освещенность в центре кадра, в то время как края освещены плохо. На рисунке 2б представлено изображение, которое передается U-Net для выполнения процедуры сегментации. Белой линией показана круглая корректная область. В нее практически не попадает плотный осадок в нижнем левом углу, а также обрезаны края с более худшим освещением. Белая линия, определяющая край корректной области не передается в составе изображения в нейронную сеть для сегментации. Ее назначение – это оценка корректности выбранной области изображения для последующего выделения контуров.

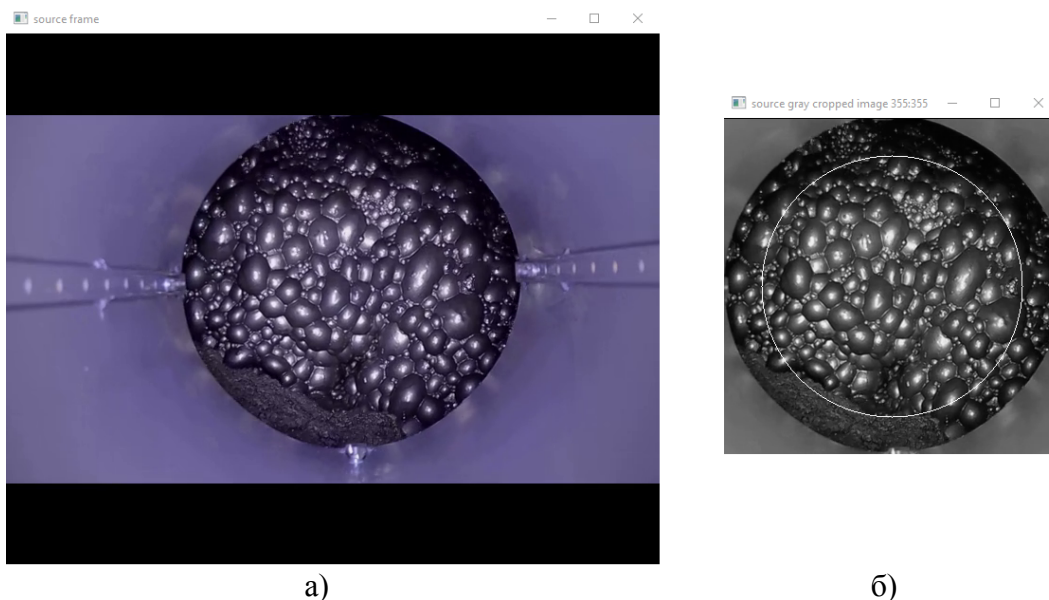


Рисунок 2. Исходное изображение и корректная область

На рисунке 3а представлен результат сегментации изображения нейронной сетью U-Net. Цель нейронной сети – провести границу между пузырьками. Толщина границ составляет всего один пиксель. Это оказывает минимальное влияние на расчет площадей, даже не смотря на наличие незамкнутых линий.

На рисунке 3б представлено изображение, полностью созданное из массива контуров, выделенных из результата сегментации (рисунок 3а). В левом верхнем углу (рисунок 3б) показано время обработки одной картинки в миллисекундах.

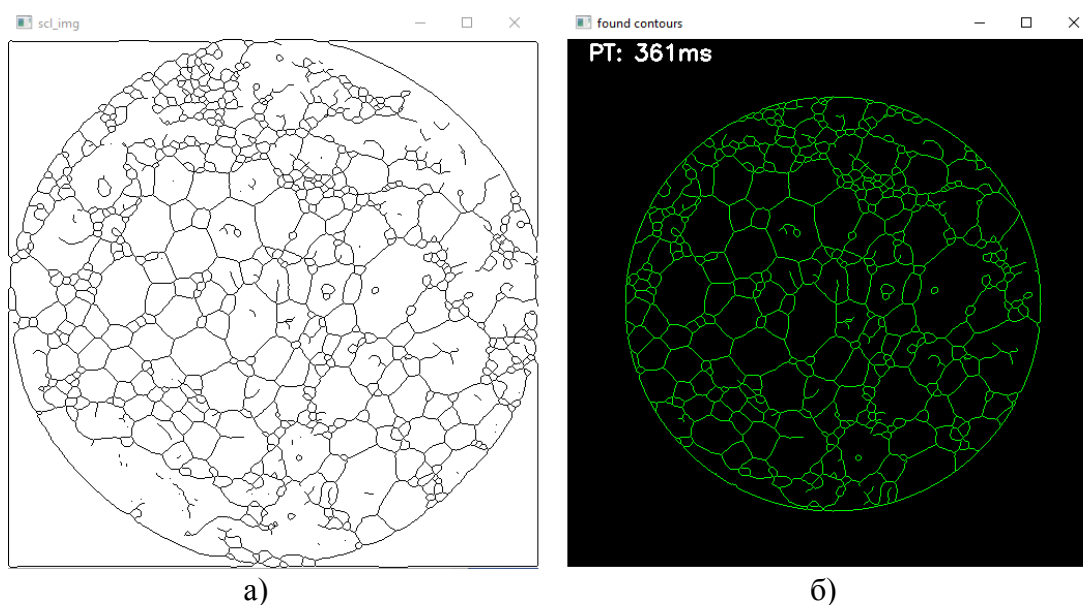


Рисунок 3. Результат сегментации и определения контуров

Для оценки качества флотационного процесса используется распределение пузырьков по размерам по отношению к площади всего изображения. Для визуализации в реальном времени используется гистограмма. Вид гистограммы для одного из кадров представлен на рисунке 4.

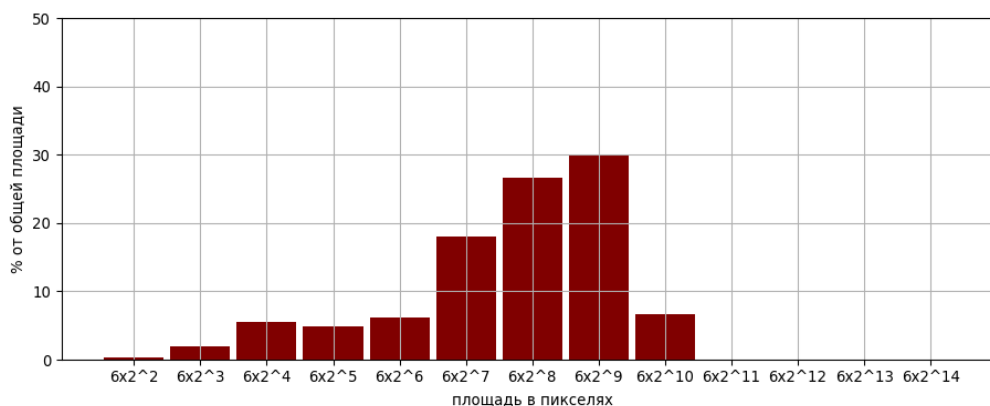


Рисунок 4. Гистограмма распределения пузырьков

На горизонтальной оси отложены значения категорий пузырьков согласно их площади. Первый диапазон от 0 до  $6 \times 2^2$  пикселей, второй диапазон от  $6 \times 2^2$  до  $6 \times 2^3$  пикселей и так далее. Максимальное значение  $6 \times 2^{14}$ , что примерно равно всей площади корректной области. На вертикальной оси в процентах указано заполнение пузырьками заданного диапазона размеров от общей площади корректной области.

Вид гистограмм для разных моментов времени в ходе процесса флотации представлен на рисунке 5.

На рисунке 5а гистограмма имеет максимальное значение в диапазоне от  $6 \times 2^8$  до  $6 \times 2^9$ , на изображении с камеры явно преобладают относительно крупные пузырьки. На рисунке 5б гистограмма имеет примерно равные уровни с небольшим увеличением в диапазоне от  $6 \times 2^6$  до  $6 \times 2^7$ , на изображении с камеры присутствуют пузырьки разных размеров, в том числе и большие, но при этом заметно небольшое преобладание относительно небольших пузырьков.



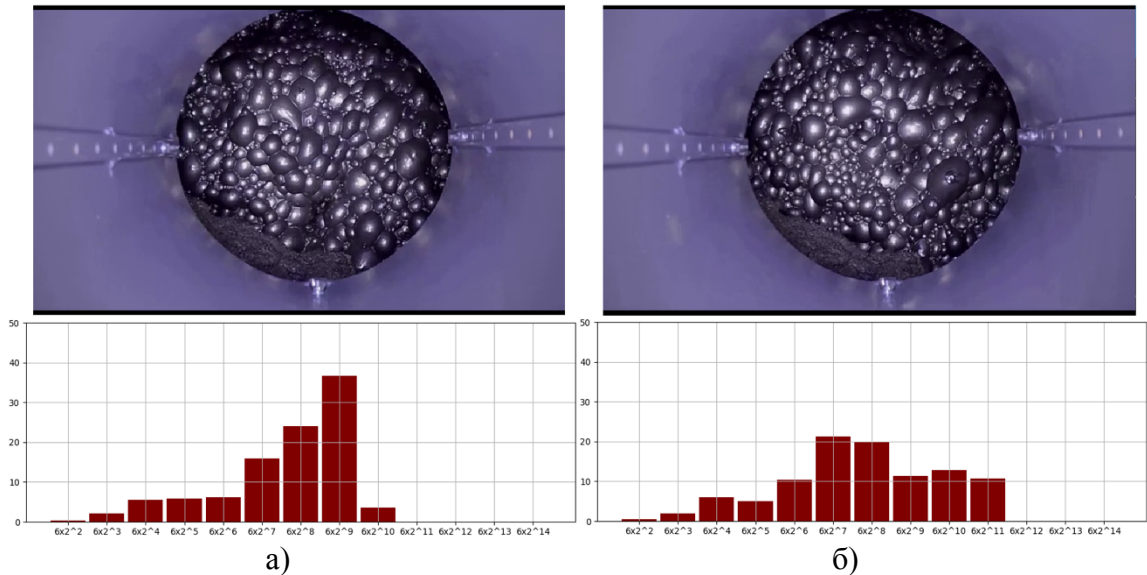


Рисунок 5. Изображение пены и соответствующая гистограмма в разные моменты времени

### Скорость обработки данных

В качестве аппаратной платформы использовался персональный компьютер со следующими основными характеристиками: процессор AMD Ryzen 5 3600 (6 ядер с частотой 3.60 ГГц), оперативная память DDR4 16 Гбайт, видеокарта NVIDIA GTX1660 6 Гбайт, диск Samsung SSD 860 EVO 250 Гбайт. Программа написана на языке Python без явного использования методов параллельных вычислений. Сегментация изображения выполнялась с помощью фреймворка PyTorch [5]. Дополнительная обработка изображения выполнялась с использованием библиотеки OpenCV. Среднее время обработки одного кадра для представленного функционала программы составляет 380 миллисекунд.

Загрузка центрального процессора и ядер Cuda видеокарты представлены на рисунке 6. Загрузка центрального процессора в среднем составляет порядка 53 %. Из графиков видно, что не все ядра загружены по максимуму, часть логических ядер фактически не участвует в вычислениях. Задачей видеокарты является сегментация одного кадра за одну итерацию. Обработка большого количества кадров за раз не целесообразна, т.к. результаты вычислений не будет актуальным с точки зрения мониторинга технологического процесса. Загрузка ядер Cuda не превышает 47 %.

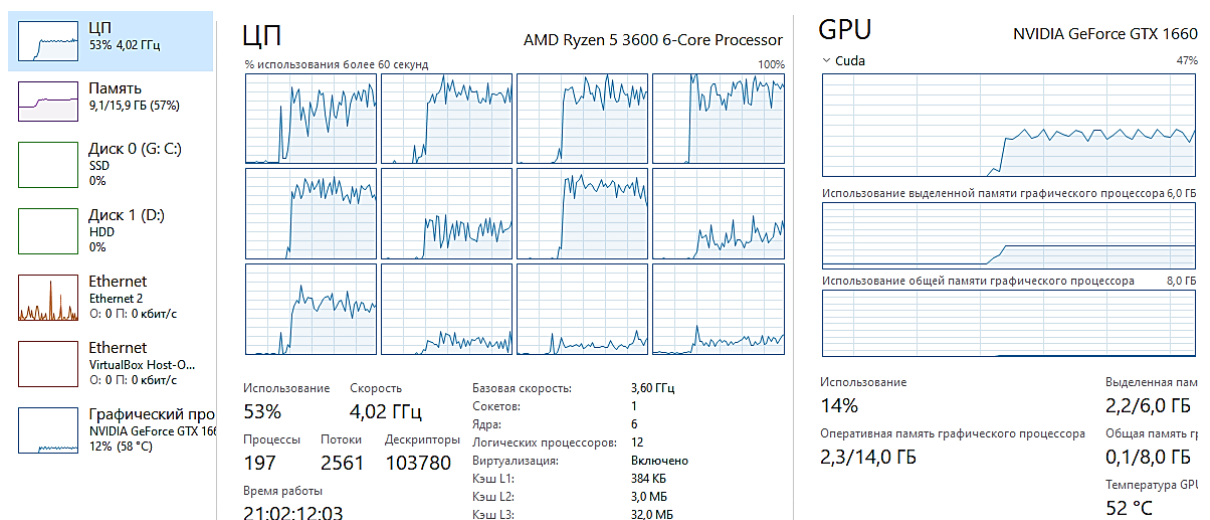


Рисунок 6. Использование ресурсов компьютера

Использование памяти видеокарты (менее 2 Гбайт), а также оперативной памяти компьютера (используется около 3 Гбайт) не значительно.

Скорость обработки кадра может быть значительно увеличена за счет лучшего распараллеливания вычислений на центральном процессоре, а также за счет переноса части вычислений на процессор видеокарты. Также заметное влияние оказывает использование языка программирования Python. Реализация на языке программирования C++ должна способствовать увеличению скорости обработки.

### **Заключение**

Разработанное программное обеспечение корректно оценивает размеры пузырьков и степень заполнения области изображения. На основе данной информации могут быть сформированы управляющие воздействия в контуре управления процессом флотации. Для определения взаимосвязи между размерами пузырьков и ходом технологического процесса должна быть набрана статистика в достаточном объеме.

Скорость обработки одного кадра порядка 380 миллисекунд достаточна для статистического контроля размеров пузырьков, т.к. изменения процесса флотации протекают достаточно медленно. Для оценки скорости коллапса пузырьков необходимы дополнительные исследования, но реализованного функционала программы достаточно для проведения данных измерений. Если потребуется уменьшение скорости обработки одного кадра, то необходимо либо использовать новые технологии при разработке программного обеспечения, либо использовать более производительную аппаратную платформу. Т.к. работы в данном направлении находятся в стадии исследования, целесообразно на текущем этапе использовать более производительную платформу. Оптимизацию программного обеспечения можно выполнить на стадии разработки конечного продукта.

Кроме размеров можно оценить форму пузырьков. Для этого алгоритм необходимо дополнить соответствующими операциями с массивом контуров. Дополнительный функционал увеличит вычислительные затраты, что может привести к увеличению времени обработки одного кадра.

В настоящее время рассматривается вопрос использования данного программного обеспечения на реальной работающей установке с целью получения необходимых зависимостей.

### *Использованные источники:*

1. Пыхов В.В., Шнайдер Д.А. Методы анализа изображений пены для оптимизации процесса флотации. НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 23-24 марта 2022 г. – М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 149–157.
2. Getting Started with Videos. – URL: [https://docs.opencv.org/4.x/dd/d43/tutorial\\_py\\_video\\_display.html](https://docs.opencv.org/4.x/dd/d43/tutorial_py_video_display.html) (дата обращения: 12.12.2023).
3. Color conversions. – URL: [https://docs.opencv.org/3.4/de/d25/imgproc\\_color\\_conversions.html](https://docs.opencv.org/3.4/de/d25/imgproc_color_conversions.html) (дата обращения: 12.12.2023).
4. Contours: Getting Started. – URL: [https://docs.opencv.org/4.x/d4/d73/tutorial\\_py\\_contours\\_begin.html](https://docs.opencv.org/4.x/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html) (дата обращения: 12.12.2023).
5. Pytorch. – URL: <https://github.com/pytorch> (дата обращения: 12.12.2023).

## СХОЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА FR-4

Шульгин А. Н., Шахова О.А., Евсеев Г.А., Тебайкин Д.С.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

[ANShulgin@mephi.ru](mailto:ANShulgin@mephi.ru)

В данной статье проводится статистический анализ схождения теоретических и экспериментальных данных при определении рациональных режимов сверления фольгированного стеклотекстолита марки FR-4. Сопутствующие графоаналитические построения и необходимые расчеты выполнены в среде математического моделирования MathCAD.

*Ключевые слова:* режущий инструмент, режимы резания, осевая составляющая силы резания, скорость движения осевой подачи, частота вращения шпинделя.

## CONVERGENCE OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DATA IN DETERMINING THE RATIONAL CUTTING MODES BY DRILLING FR-4 MATERIAL

Shulgin A.N., Shakhova O.A., Evseev G.A., Tebaykin D.S.

*Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI, Chelyabinsk region*

The article provides a statistical analysis of the convergence of theoretical and experimental data in determining the rational drilling modes of the FR-4 foil fiberglass material. The accompanying graph analytical constructions and the necessary calculations were performed in the MathCAD mathematical modeling environment.

*Keywords:* cutting tool, cutting modes, axial cutting force, axial feed speed, spindle speed

Обрабатываемый материал представляет слоистую композицию пластика, которая выполнена из стеклонаполненной основы и полимерной связки [1] – [4]. На сегодняшний день сверление, как способ получения отверстий на печатных платах остается одним из основных, поскольку обеспечивает заданную производительность отверстий при гарантированном качестве изготовления.

Для набора статистики и проведения статистического анализа данных для каждого режима резания проведено 9 измерений осевой составляющей силы резания, с помощью ранее разработанной компьютерной имитационной модели [4]. Для проверки схождения теоретических и экспериментальных исследований и получения выходных данных, размер сетки конечных элементов базового материала существенно увеличен.

Согласно проведенных теоретических исследований по сверлению отверстий на фольгированном стеклотекстолите получены и построены графические зависимости осевой составляющей силы резания  $P_0$  на режимах резания с частотой вращения шпинделя  $n = 36\ 000$  об/мин и скоростью движения осевой подачи  $S = 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2100, 2300, 2500, 2700$  мм/мин. С другой стороны, проведены запланированные экспериментальные исследования процесса сверления на всех ранее определенных режимах резания, включая режимы, симуляция которых проводилась методами конечно-элементного моделирования в пакетах ANSYS и LS-DYNA [4].

Для определения схождения теоретических и практических исследований необходимо провести анализ выходных данных с совмещением графики осевой составляющей силы резания  $P_0$  и нахождением средних значений.

Для построения графических зависимостей по  $P_0$  использован пакет MathCAD. В таблице 1 сведены графические зависимости осевой составляющей силы резания от времени для материала марки FR-4 при использовании твердосплавных сверл  $\varnothing 1$  мм. Согласно совмещенных выходных данных по  $P_0$  видим, что структура, форма, характер и предельные значения зависимостей похожи.

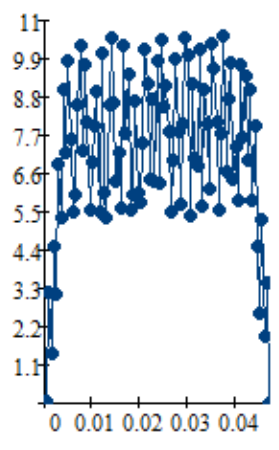
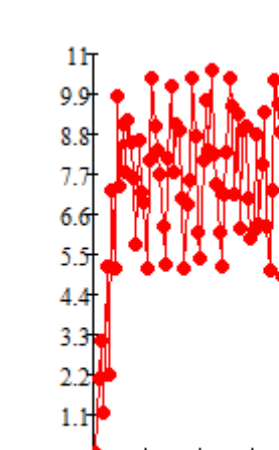
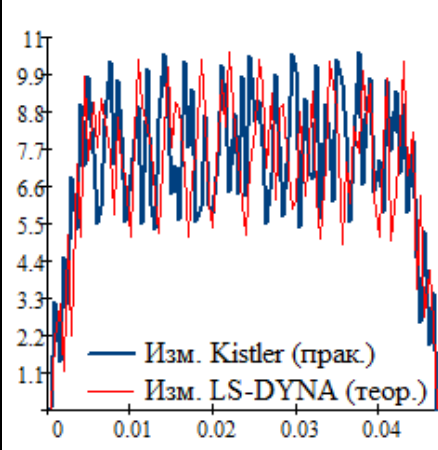
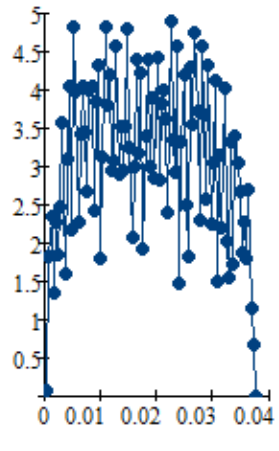
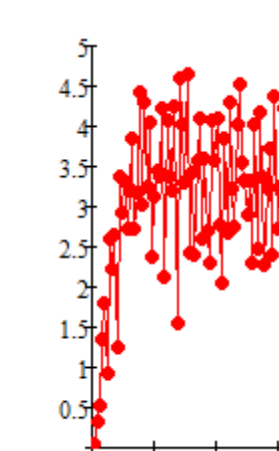
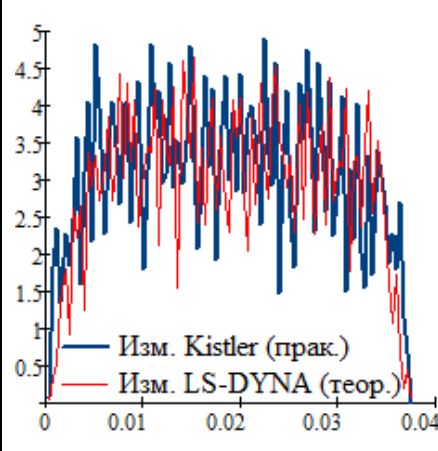
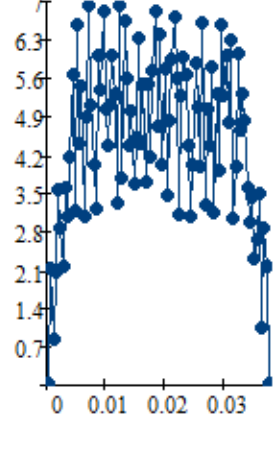
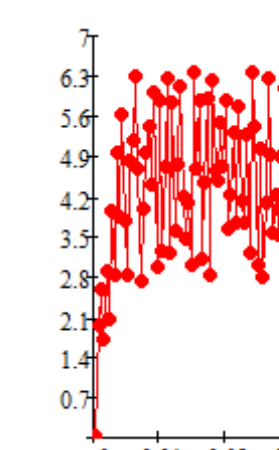
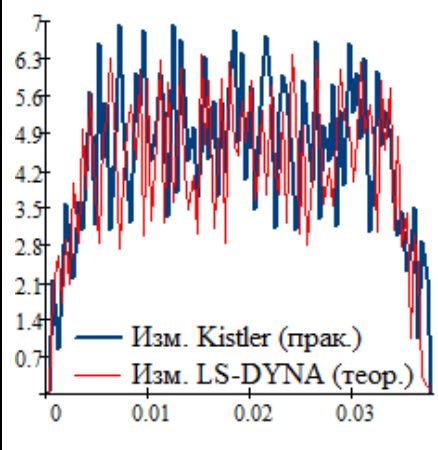
Таблица 1 – Результаты обработки теоретических и экспериментальных данных

№	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$ , Н	Измерения LS-DYNA (мат. моделир.), $P_0(t)$ , Н	Сводные данные, $P_0(t)$ , Н
1.	$S = 1100$ мм/мин			
2.	$S = 1300$ мм/мин			
3.	$S = 1500$ мм/мин			

Продолжение таблицы 1

№	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$ , Н	Измерения LS-DYNA (мат. моделир.), $P_0(t)$ , Н	Сводные данные, $P_0(t)$ , Н
4.	S = 1700 мм/мин			<p>— Изм. Kistler (прак.) — Изм. LS-DYNA (теор.)</p>
5.	S = 1900 мм/мин			<p>— Изм. Kistler (прак.) — Изм. LS-DYNA (теор.)</p>
6.	S = 2100 мм/мин			<p>— Изм. Kistler (прак.) — Изм. LS-DYNA (теор.)</p>

Окончание таблицы 1

№	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$ , Н	Измерения LS-DYNA (мат. моделиров.), $P_0(t)$ , Н	Сводные данные, $P_0(t)$ , Н
7.	S = 2300 мм/мин			
8.	S = 2500 мм/мин			
9.	S = 2700 мм/мин			

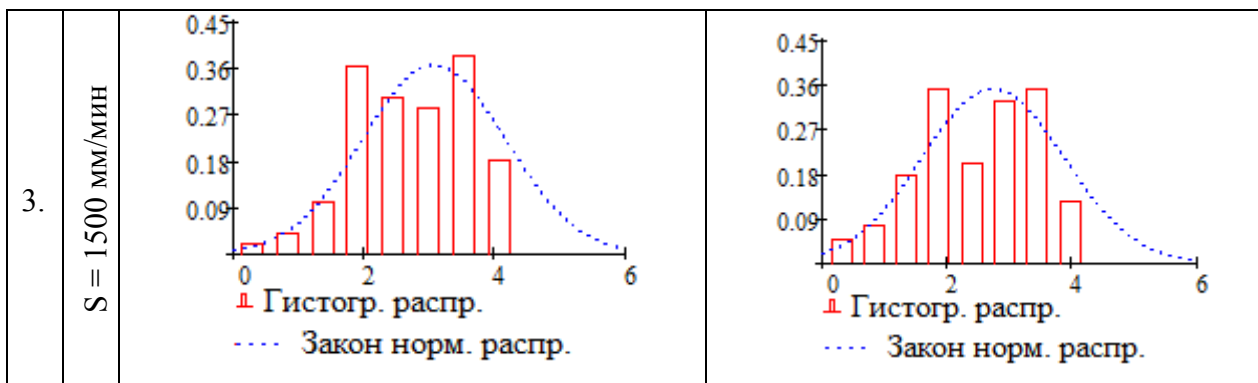


Установление схождения теоретических и экспериментальных данных проведено с помощью аппарата математической статистики. Проверка принадлежности двух выборок одной и той же генеральной совокупности может быть проведена с помощью параметрических и непараметрических критериев. Параметрические критерии базируются на нормальном типе распределения генеральной совокупности или используют параметры этой совокупности. Непараметрические критерии не опираются на тип распределения генеральной совокупности и не используют параметры этой совокупности.

Таким образом, для выбора критерия проверки гипотез необходимо предварительно определить характер распределения генеральных совокупностей. Для этого, с помощью пакета MathCAD строим гистограммы распределений для ранее обозначенного материала и режимов сверления и сравним их с нормальным законом распределения. При построении графических зависимостей использованы следующие встроенные статистические функции программы  $\text{mean}(x)$  – математическое ожидание,  $\text{stdev}(x)$  – среднеквадратическое отклонение,  $\text{dnorm}(x, m, S)$  – плотность вероятности для нормального распределения,  $\text{hist}(\text{int}, x)$  – функция для построения группировочного статистического ряда, где  $\text{int}$  – набор точек, расположенных по возрастанию и определяющих последовательность интервалов в гистограмме. В таблице 2 представлены графики нормального закона распределения и фактические гистограммы распределения на режимах резания  $n = 36\,000$  об/мин;  $S = 1100, 1300, 1500$  мм/мин.

Таблица 2 – Построение гистограмм распределений

№	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$ , Н	Измерения LS-DYNA, $P_0(t)$ , Н
1.	S = 1100 мм/мин	<p>Гистогр. распр. Закон норм. распр.</p>	<p>Гистогр. распр. Закон норм. распр.</p>
2.	S = 1300 мм/мин	<p>Гистогр. распр. Закон норм. распр.</p>	<p>Гистогр. распр. Закон норм. распр.</p>



Таким образом, очевидно, что характер распределения генеральных совокупностей имеет отличный от нормального закон распределения. Для проведения дальнейшей проверки принадлежности двух выборок одной и той же генеральной совокупности используем одну из наиболее мощных непараметрических гипотез – критерий знаков. Суть гипотезы заключается в сравнении генеральной совокупности, если принять, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания сопоставимы. Таким образом, если гипотеза истина, то вероятность положительной разности должна быть равна вероятности отрицательной разнице. Для проверки этой гипотезы применяется критерий  $K^+$ , который определяет число положительных разностей  $d$ . Расчет разностей в выборках приведен в таблице 3. Для наглядности отрицательные разности дополнительно выделены цветом.

Таблица 16 – Расчет разностей в выборках

t, сек	Теория	Практ.	$d_i = x_i - y_i$	t, сек	Теория	Практ.	$d_i = x_i - y_i$	t, сек	Теория	Практ.	$d_i = x_i - y_i$
0,001	0,01351	0,01214	0,00137	0,032	3,28979	3,73523	-0,44544	0,063	4,35181	3,96331	0,38850
0,002	1,66626	0,83813	0,82813	0,033	4,21753	2,39148	1,82605	0,064	3,29285	1,96494	1,32791
0,003	0,71274	1,89819	-1,18545	0,034	3,54822	4,38232	-0,8341	0,065	4,47083	3,30505	1,16578
0,004	2,33765	2,83813	-0,50048	0,035	2,87476	2,71606	0,1587	0,066	2,99072	4,43115	-1,44043
0,005	3,06091	2,70081	0,3601	0,036	3,11584	3,25928	-0,14344	0,067	2,33765	2,36511	-0,02746
0,006	2,94287	1,88599	1,05688	0,037	4,35388	3,17993	1,17395	0,068	3,32642	3,17078	0,15564
0,007	3,22266	2,20239	1,02027	0,038	3,87268	4,21355	-0,34087	0,069	2,43835	2,14844	0,28991
0,008	2,89307	1,41907	1,474	0,039	2,99683	1,76379	1,23304	0,07	4,66614	2,34375	2,32239
0,009	2,57874	2,69775	-0,11901	0,04	3,24097	3,22571	0,01526	0,071	3,93982	4,82788	-0,88806
0,01	2,96326	3,07922	-0,11596	0,041	2,74451	3,31421	-0,5697	0,072	3,39355	3,14941	0,24414
0,011	3,74146	2,17993	1,56153	0,042	3,80554	2,37122	1,43432	0,073	3,74756	4,08936	-0,3418
0,012	4,14875	3,76489	0,38386	0,043	4,46167	3,44543	1,01624	0,074	2,07214	2,65808	-0,58594
0,013	2,11987	2,31018	-0,19031	0,044	3,29121	4,20837	-0,91716	0,075	3,54004	3,43225	0,10779
0,014	3,48042	3,26538	0,21504	0,045	3,50342	3,68042	-0,177	0,076	2,95541	2,83606	0,11935
0,015	1,71279	4,26282	-2,55003	0,046	3,10059	4,34854	-1,24795	0,077	3,05176	3,45542	-0,40366
0,016	3,11589	1,82271	1,29318	0,047	2,67334	2,99988	-0,32654	0,078	4,53491	4,35573	0,17918
0,017	2,07922	4,23584	-2,15662	0,048	3,97644	3,58582	0,39062	0,079	2,71301	3,29015	-0,57714
0,018	3,85132	3,35388	0,49744	0,049	2,46069	3,84827	-1,38758	0,08	3,35083	4,06086	-0,71003
0,019	4,67573	2,14026	2,53547	0,05	3,87268	3,73523	0,13745	0,081	1,55334	3,12545	-1,57211
0,02	3,81775	4,53601	-0,71826	0,051	4,29285	4,00793	0,28492	0,082	2,61133	3,61245	-1,00112
0,021	2,64599	3,55835	-0,91236	0,052	1,95923	2,10059	-0,14136	0,083	3,65601	1,97378	1,68223
0,022	2,28882	3,33557	-1,04675	0,053	3,21596	3,24707	-0,03111	0,084	2,60562	3,40572	-0,8001
0,023	3,22876	2,89001	0,33875	0,054	2,20032	2,21863	-0,01831	0,085	4,28772	1,73972	2,548
0,024	2,91748	3,31934	-0,40186	0,055	3,73584	1,95564	1,7802	0,086	2,17896	3,21424	-1,03528
0,025	4,05273	2,29187	1,76086	0,056	4,65601	3,32947	1,32654	0,087	1,60828	1,85442	-0,24614
0,026	2,05273	4,02222	-1,96949	0,057	3,78418	2,82288	0,9613	0,088	2,75781	3,09346	-0,33565
0,027	3,76282	2,47083	1,29199	0,058	2,76074	4,40815	-1,64741	0,089	1,44868	1,41978	0,0289
0,028	4,25251	4,16941	0,0831	0,059	4,18604	2,81575	1,37029	0,09	3,24707	2,22124	1,02583
0,029	3,35693	3,37524	-0,01831	0,06	3,29559	1,95715	1,33844	0,091	2,43225	1,07895	1,3533
0,03	2,10364	2,28577	-0,18213	0,061	2,69547	4,20227	-1,5068	0,092	1,93274	0,14545	1,78729
0,031	3,43628	3,23181	0,20447	0,062	3,45972	2,88391	0,57581	0,093	2,21841	0,44789	1,77052
								0,094	0,02817	0,01012	0,01805

Выдвигается гипотеза:

$$(1) \quad H_0: F_i(x) = G_i(x)$$

Гипотеза  $H_0$  отвергается, если расчетное значение критерия превышает некоторое критическое значение:

$$(2) \quad F \geq F_{\alpha, m_1, m_2}$$

В теоретической статистике доказано, что для приближенной оценки критериев знака можно использовать распределение Фишера. В этом случае критическое значение гипотезы преобразуется к виду:

$$(3) \quad F = \frac{k^+}{n^* - k^+ + 1}$$

где  $K^+$  - количество положительных разностей;  $n^*$  - количество разностей, не равных нулю;  $\alpha=0,01$

$$(4) \quad \frac{k^+}{n^* - k^+ + 1} = 1,15909$$

Оценка гипотезы:

гипотеза отвергается:

$$(5) \quad \frac{k^+}{n^* - k^+ + 1} \geq F_{\alpha, m_1, m_2}$$

гипотеза принимается:

$$(6) \quad \frac{k^+}{n^* - k^+ + 1} < F_{\alpha, m_1, m_2}$$

По принятому значению вероятности ошибки при уровне значимости  $\alpha=0,01$ , а также значениям  $m_1$  и  $m_2$  из таблицы распределения Фишера находим соответствующее значение критерия:  $F_{\alpha, m_1, m_2} = 1,836$  [2].

В результате получаем:  $1,15909 < 1,836$

Таким образом, можно сделать вывод, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания, принадлежат к одной генеральной совокупности. Результаты статистической обработки по остальным режимам представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	Режим обработки	$\frac{k^+}{n^* - k^+ + 1}$
1.	$n = 36\ 000$ об/мин; $S = 1100$ мм/мин	1,1591
2.	$n = 36\ 000$ об/мин; $S = 1300$ мм/мин	1,6389
3.	$n = 36\ 000$ об/мин; $S = 1500$ мм/мин	1,0652

4.	n = 36 000 об/мин; S = 1700 мм/мин	1,3171
5.	n = 36 000 об/мин; S = 1900 мм/мин	1,2619
6.	n = 36 000 об/мин; S = 2100 мм/мин	1,5
7.	n = 36 000 об/мин; S = 2300 мм/мин	0,8627
8.	n = 36 000 об/мин; S = 2500 мм/мин	1,1111
9.	n = 36 000 об/мин; S = 2700 мм/мин	1,375
Табличное значение		< 1,836

Таким образом, согласно проведенной статистической обработке установлено сходение теоретических и экспериментальных данных на всех режимах обработки. Отсутствие более точной сходимости обусловлено отсутствием эпоксидных слоев компаунда для межслойного скрепления композиционного материала при моделировании заготовки в LS-DYNA (слои стеклоткани были просто склеены – команда vglue – для сокращения времени расчетов), сложным механизмом разрушения эпоксидной матрицы и межфазном расслоении ткани.

Тем не менее, сходимость теоретических и экспериментальных данных очевидна и находится в пределах погрешности построения конечно-элементных моделей и проведения экспериментальных исследований.

*Использованные источники:*

1. Шульгин А.Н., Дьяконов А.А., Орлов А.А. Разработка имитационной модели сверления стеклотекстолита. / А.Н. Шульгин, А.А. Дьяконов, А.А. Орлов // Естественные и технические науки. – Том 6. – 2019. – С. 35 – 36.
2. Shulgin A.N., Chuprina O.A., Pykhov V.V. The effect of tool blunting on the value of the axial component of the cutting force and the drilling process / A.N. Shulgin, O.A. Chuprina, V.V. Pykhov // Diffusion and defective data. Pt Forum on Defects and Proliferation. – 2021. – volume 410 DDF. pp. 692-696.
3. Shulgin A.N., Chuprina O.A., Ledovskikh M.D., Pykhov V.V. Determination of rational cutting modes with inclined determination of quality indicators / A.N. Shulgin, O.A. Chuprina, M.D. Ledovskikh M.D., V.V. Pykhov // Lecture notes on mechanical engineering: materials of the International scientific and practical Conference. 8th International Conference on Industrial Engineering. pp. 905-914
4. Shulgin A.N., Dyakonov A.A., Gorodkova A.E. The influence of the distribution of fiberglass filaments on the quality and productivity of hole processing on printed circuit boards / A.N. Shulgin, A.A. Dyakonov, A.E. Gorodkova // Materials Science Forum. - 2019. – No. 946. – pp. 223-227.

## СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО САМООПРЕДЕЛЕНИЯ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ

Бочкарева О.Н.<sup>1</sup>, Линник О.В.<sup>2</sup>, Певнева Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МБОУ «СОШ №125 с углубленным изучением математики»,  
Снежинск, Челябинская обл.

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.  
[bochkareva2009@yandex.ru](mailto:bochkareva2009@yandex.ru)

Аннотация: в статье представлена модель организации условий формирования мотивированного самоопределения обучающихся инженерного класса средней школы на основе сетевого межорганизационного взаимодействия при взаимодействии «школа – вуз – предприятие – администрация города».

*Ключевые слова:* подготовка будущего инженера, профессиональные пробы, образовательные события профориентационной направленности.

## SUPPORT OF PROFESSIONAL SELF-DETERMINATION OF FUTURE ENGINEERS

Bochkareva O.N.<sup>1</sup>, Linnik O.V.<sup>2</sup>, Pevneva N.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MBOU "Secondary school No. 125 with in-depth study of mathematics", Snezhinsk,  
Chelyabinsk Region <sup>2</sup> Snezhinsk Institute of Physics and Technology of the National Research  
Nuclear University MEPHI, Snezhinsk, Chelyabinsk Region.

[bochkareva2009@yandex.ru](mailto:bochkareva2009@yandex.ru)

Abstract: the article presents a model of the organization of conditions for the formation of motivated self-determination of students of the engineering class of secondary school on the basis of network interorganizational interaction in the interaction "school - university – enterprise – city administration".

Annotation:

*Keywords:* training of a future engineer, professional tests, educational events of career orientation.

Актуальность вопросов профессионального самоопределения населения и подготовки трудовых ресурсов для экономики России в целом и Челябинской области в частности обусловлено, с одной стороны, «кадровым голодом», с другой – «дефицитом желающих работать» [1]. За последние 15 лет поток студентов перераспределился в пользу сферы услуг с сокращением численности в отраслях первичного и вторичного секторов экономики, а именно в обрабатывающих и добывающих производствах, образовании, сельском хозяйстве [2]. Рынок труда испытывает нехватку квалифицированных рабочих и специалистов, но в связи с быстрым развитием технологий на смену привычному понятию «профессия» приходит набор компетенций (soft skills) работника, которые позволяют учиться и самообразовываться, могут быть применены в разных сферах деятельности. Таким образом, для развития современной экономики в Челябинской области необходимы кадры, подготавливаемые по-новому, а профориентационная работа в школе требует разработку нестандартных управленческих решений, формирование научно-методологических и нормативных основ, широко использующих возможности развития сетевых программ образования в регионе. Создание модели профориентации в конкретно школе возможно при

использовании ресурсов образовательной организации, дополнительного образования, использовании потенциала вузов и предприятий [3].

Обеспечение единых организационных и методических условий реализации профориентационного минимума возможны в соответствии с Федеральным законом N 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» (с изменениями от 24.07.2023 N 385-ФЗ); Методическими рекомендациями по организации внеурочной деятельности, направленными письмом Минпросвещения России от 05 июля 2022 г. N ТВ-1290/03; примерной рабочей программой воспитания для общеобразовательных организаций (одобрена решением федерального учебно-методического объединения по общему образованию (ФУМО ОО), протокол от 23 июня 2022 г. N 3/22); ФГОС ОО, ФГОС СОО; примерной рабочей программой курса внеурочной деятельности «Билет в будущее» (одобрена решением ФУМО ОО, протокол от 29 сентября 2022 г. N 7/22); примерной рабочей программой курса внеурочной деятельности «Профориентация» (одобрена ФУМО ОО, протокол от 25 августа 2022 г. N 5/22).

Сетевое межорганизационное взаимодействие может быть организовано на основе «Методических рекомендаций для субъектов Российской Федерации по вопросам реализации основных и дополнительных общеобразовательных программ в сетевой форме» (утв. Минпросвещения России 28.06.2019 N МР-81/02вн), а активное использование имеющихся материально-технических и инфраструктурных ресурсов организаций способствует более эффективному сетевому взаимодействию между организациями.

Для реализации профориентационного проекта необходимо создание модели организации обучения на уровне среднего общего образования по индивидуальным образовательным маршрутам, выстраиваемым с учетом мнения каждого обучающегося, где будет сочетаться изучение предметов базового, углубленного уровней и элективных курсов, направленных на профориентационную заинтересованность, а также проектная деятельность обучающихся на площадках сетевых партнеров.

У МБОУ «СОШ №125 с углубленным изучением математики» есть опыт, возможности и необходимые ресурсы для ранней профориентации и мотивированного самоопределения учащихся к профессиональной инженерной деятельности. Формирование у обучающихся прикладных знаний и предпрофессиональных умений, необходимых для учебы и профессиональной подготовки, организовано на основе сетевого взаимодействия «школа-вуз-предприятие» (МБОУ СОШ №125, СФТИ НИЯУ МИФИ, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», особая роль КБ-2), межорганизационного взаимодействия с организациями дополнительного образования детей (Региональный центр выявления, поддержки и развития способностей и талантов у детей и молодежи «Курчатов-центр», IT-куб и т.д.) при активной поддержке Управления образования города Снежинска (рисунок 1).



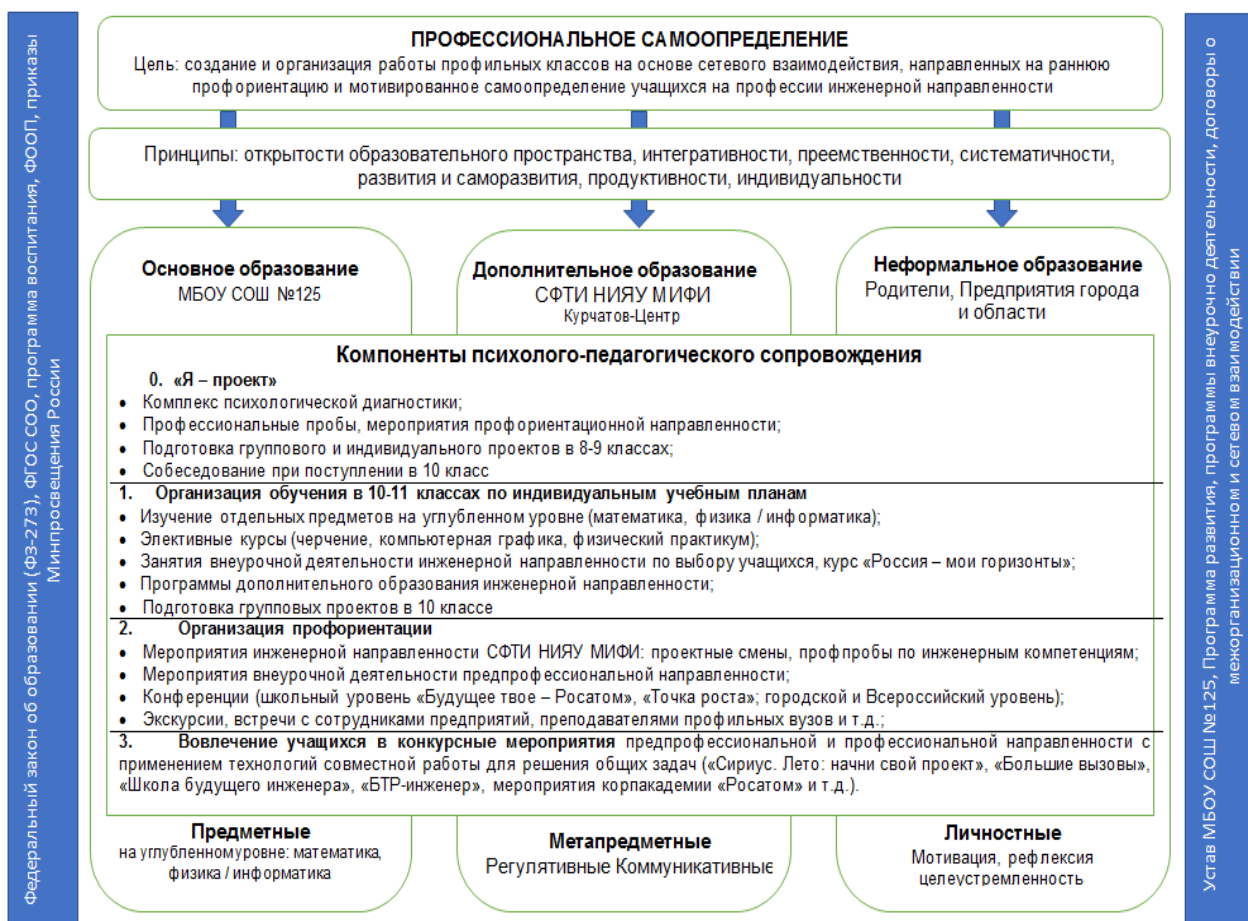


Рисунок 1. Схема организации профессионального самоопределения в инженерном классе МБОУ СОШ №125

Работа вуза с партнёрской школой ведется на основании четырехстороннего «Соглашения о сотрудничестве между ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», СФТИ НИЯУ МИФИ, Управлением образования администрации города Снежинска и МБОУ СОШ № 125 с целью реализации образовательного проекта «Инженерный класс», а также действующей в вузе программы ранней профориентации по привлечению талантливой молодежи в атомную отрасль «Открой себя в МИФИ».

Обучение организовано с учетом запросов учащихся 10-11 классов по индивидуальным учебным планам с изучением отдельных предметов на углубленном уровне, занятий внеурочной деятельности с использованием ресурсов сетевого взаимодействия. Система профориентации в МБОУ СОШ №125 строится через образовательные события профориентационной направленности: дополнительное образование, внеурочную деятельность, внеклассные мероприятия (профпробы, конференции, образовательные экскурсии и т.д.) с использованием ресурсов организаций-партнеров, при участии представителей вузов, ученых, администрации города, родителей.

Особая роль в профориентации отводится студентам-наставникам, которые под руководством преподавателей СФТИ НИЯУ МИФИ проводят для школьников элективные курсы, а также занимаются проектной деятельностью в рамках Федеральной образовательной инициативы «Сириус: лето. Начни свой проект», сочетая задачи качественного образовательного сопровождения практикоориентированных мероприятий с личным примером «значимого взрослого».

В 2023 году инженерный класс МБОУ СОШ №125 одним из первых в Челябинской области получил статус Губернаторского (в рамках региональной программы «Инженер будущего74» к участию в конкурсном отборе было подано 40 заявок, победителями признаны 15 десятых классов, в их числе - 10 класс МБОУ «СОШ №125 с углублённым

изучением математики»). При этом главным критерием отбора для конкурсной комиссии стал реальный опыт сотрудничества школ с вузами и производственными предприятиями, а также наличие участников профильных программ, мероприятий образовательного центра «Сириус» и «Курчатов Центра». Также в 2023 году МБОУ СОШ №125 вошла в число региональных инновационных площадок по направлению «Сетевое межорганизационное взаимодействие для достижения обучающимися профориентационного минимума на продвинутом уровне», подтвердив тем самым эффективность ведущейся работы по сопровождению самоопределения будущих инженеров.

*Использованные источники:*

1. Бочкарева О.Н. Создание условий профессионального самоопределения будущих инженеров / О.Н. Бочкарева // В сборнике: Формирование мышления в процессе обучения естественнонаучным, технологическим и математическим дисциплинам. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.П. Усольцев. Екатеринбург, 2023. С. 120-124.
2. Телюбаева А.Ж. Исследование результативности программ профессионального обучения школьников: карьерные и миграционные стратегии // Science for Education Today. – 2023. – Т.13 №1. – С.108-133.
3. В России возник острый дефицит кадров на рынке труда. – URL: <https://lenta.ru/news/2022/01/05/deficit/>

## ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОДНА ИЗ ДВИЖУЩИХ СИЛ РАЗВИТИЯ

Горин Н.В., Водолага Б.К., Кузнецов Е.В.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.  
[n.gorin@vniitf.ru](mailto:n.gorin@vniitf.ru)

Отмечено, что основные вызовы современности – загрязнение окружающей среды, рост концентрации парниковых газов и климатические изменения, вызваны всем ходом развития человечества на основе сформировавшейся тысячелетия назад цивилизационной парадигмы. Природу и окружающую среду всегда рассматривали как неограниченный источник сырья для удовлетворения непрерывно возрастающих потребностей и места утилизации отходов. Парадигму изменить невозможно, ее придется корректировать, отказаться от сжигания углеводородного топлива и принять новую технологическую платформу энергетики на основе ядерных и радиационных технологий быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ. Рассмотрены особенности новой технологии, как основной движущей силы развития и отмечены дополняющие ее некоторые ядерные и радиационные технологии.

*Ключевые слова: Цивилизационная парадигма, вызовы современности, защита окружающей среды, атомная энергетика, замкнутый ядерный топливный цикл.*

## NUCLEAR TECHNOLOGIES AS ONE OF THE KEY DRIVERS IN DEVELOPMENT

Gorin N.V., Vodolaga B.K., Kuznetsov E.V.  
FSUE RFNC - VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin, Snezhinsk.  
[n.gorin@vniitf.ru](mailto:n.gorin@vniitf.ru)

It is noted that today's key challenges associated with environmental pollution, rising concentrations of greenhouse gases, and climatic changes have come largely from the course of human development based on the civilization paradigm which was formed thousands of years ago. People have always regarded nature and environment as an unlimited source of raw materials to meet their ever-growing needs and as a waste disposal site. This paradigm cannot be reversed, though it can be shifted. People must stop burning HC fuel and take a new technological power industry platform based on nuclear and radiation technologies of fast reactors with closed fuel cycle. Features of the new technology as a key driver in modern development are considered. Some complementary nuclear and radiation technologies have also been highlighted.

*Keywords: Civilization paradigm, today's challenges, environmental protection, nuclear power industry, closed fuel cycle.*

### Введение

В течение всех тысячелетий своей истории человечество создавало и совершенствовало технологии, стремясь к повышению уровня жизни. Первыми прорывными технологиями было освоение огня и изобретение колеса, которые положили начало современной энергетике и технике. Затем последовало создание других технологий, сформировавших современную цивилизацию. Некоторые из них, главным образом связанные с получением энергии за счет сжигания углеводородного топлива (угля, нефти и газа), возможно стали причиной основных современных вызовов из-за загрязнения окружающей среды, роста концентрации парниковых газов и климатических изменений. Поэтому крайне необходимы новые экологически чистые технологии производства энергии для реагирования на вызовы современности и в настоящее время они предложены.

Госкорпорация «Росатом» приняла «Стратегию 2018», в соответствии с которой реакторы на быстрых нейтронах и замкнутым ЯТЦ станут основой энергетической и

экологической безопасности страны. МИД РФ назвал основные технологии борьбы с изменением климата – атомную энергетику, которая заменит сжигание углеводородов, и лесные проекты, которые обеспечат рост поглощения углекислого газа лесными массивами. Развитие атомной энергетики предусмотрено национальными проектами России.

До середины прошлого века ядерных и радиационных технологий у человечества не было, они появились несколько десятилетий назад, некоторые из них, скорее всего, станут основными движущими силами развития и смогут предложить ответ на основные вызовы современности. Выступая на Саммите тысячелетия в 2000 г. в ООН Президент РФ обратил внимание, что устойчивое развитие человечества может в энергетическом плане опираться на ядерную энергетику новой технологической платформы, а именно на основе реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ЯТЦ. В настоящее время Россия существенно продвинулась в практической реализации своих НИОКР в этом направлении, значительные успехи в этих работах демонстрирует также Китай.

Развитие атомной энергетики предусмотрено в национальных проектах России [1].

### **Ядерная технология производства энергии**

Тысячелетия назад сформировалась единственно возможная цивилизационная парадигма, когда природа и окружающая среда представлялись населению неограниченным источником сырья для удовлетворения своих непрерывно возрастающих потребностей и местом утилизации отходов [2]. В результате уже к началу XXI столетия стало ясно, что человечество кратно, возможно даже на порядок, превысило допустимый уровень воздействия на окружающую среду, критическая точка была пройдена примерно сто лет назад [3]. Изменить парадигму невозможно, т.к. единственным источником сырья и местом утилизации отходов может быть окружающая среда. Но ее придется пересматривать и заменять технологию сжигания углеводородного топлива, извлекающую энергию из атомов, загрязняющую окружающую среду и производящую углекислый газ в результате сжигания топлива, на экологически чистую, извлекающую энергию за счет другого физического процесса – деления тяжелых ядер.

Современная цивилизация использует энергию, сосредоточенную в молекулах и атомах, однако известно, что в ядрах заключена существенно бóльшая энергия, которая может быть получена либо в реакциях деления тяжелых ядер, либо при синтезе легких. Термоядерной технологии производства энергии за счет синтеза легких ядер пока нет, но даже если она и появится в ближайшее время, то ей потребуется несколько десятилетий до достижения промышленного уровня развития.

Современная структура мировой энергетики основывается на сжигании углеводородного сырья, за счет чего производится ~80% энергии. Однако доступные запасы углеводородного сырья ограничены (рис. 1, [4]), но запас энергии в ядрах урана-238, доступный в настоящее время к промышленному использованию в существующих технологиях, существенно больше. Запас энергии в уране-235 также мал и перед тем как закончится нефть, будут исчерпаны запасы урана-235, как основного топлива по приемлемым ценам для атомной энергетики с реакторами на тепловых нейтронах и открытым ЯТЦ. Следует учитывать, что информация о запасах тория и лития по разным литературным источникам заметно различается, но даже в условиях неопределенности запас современных углеводородных источников находится на уровне единиц процентов.

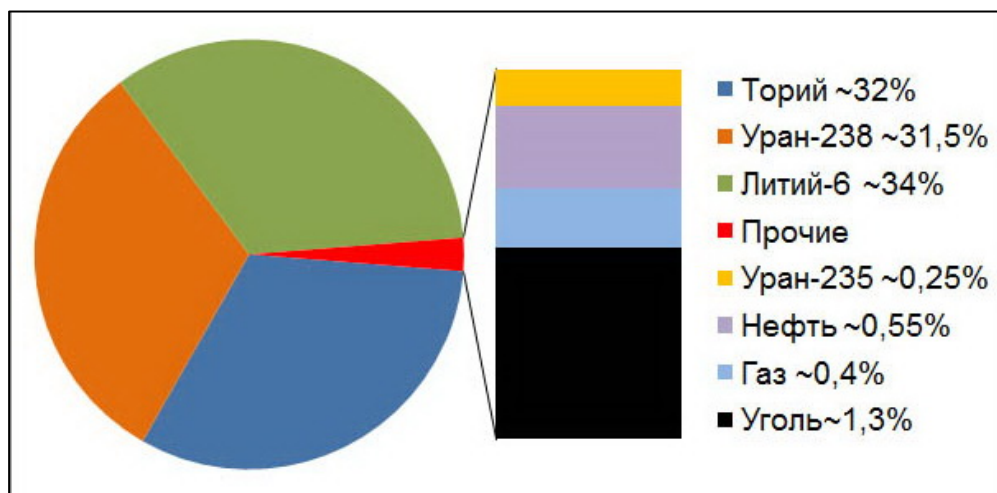


Рис. 1. Мировое распределение энергетических ресурсов [4]

### Условия реализации новой ядерной технологии производства энергии

Для реализации новой технологической платформы на быстрых реакторах с замкнутым ЯТЦ необходимо выполнение ряда условий.

Прежде всего, технологию следует обосновать, показать ее безопасность, основанную на внутренних физических принципах и отсутствие аварийных ситуаций, требующих эвакуацию населения, продемонстрировать обеспеченность сырьем на многие столетия, отработать сопутствующие ядерные и радиационные технологии по выбору топлива, технологиям его рефабрикации и обращению с отходами [5]. В настоящее время в рамках проектного направления «Прорыв» под Томском сооружается быстрый реактор БРЕСТ-ОД-300 [6] со свинцовым теплоносителем с пристанционным топливным циклом, на котором будут апробированы принятые решения и принято решение о переходе на новую технологическую платформу.

Немаловажной будет поддержка политиков, которые при обсуждении проблем атомной энергетики традиционно опасаются переключения ядерного материала, нарушений режима нераспространения и гарантий МАГАТЭ. В настоящее время при экспорте тепловых реакторов ВВЭР и возврате отработавшего топлива на переработку в Россию таких опасений нет, их не будет до тех пор, пока быстрые реакторы и производства замкнутого ЯТЦ находятся в странах, обладающих ядерным оружием, но обязательно появятся, как только начнется экспорт этих реакторов и технологий. В этом случае существенно расширится круг стран и лиц, связанных с обращением с ядерными материалами. Работы по созданию барьеров, препятствующих нарушениям гарантий МАГАТЭ, проводятся в научных центрах России [7 – 9].

Политикам приходится принимать во внимание общественное мнение. Оно ещё безоговорочно не сложилось в пользу развития атомной энергетики, а без поддержки населения, трансформирующегося в решения политиков, широкомасштабного использования атомной энергетики в мире не достичь. Поэтому важные условия связаны с поддержкой населением ядерных и радиационных технологий, с решением периодически возникающих конфликтов информационных интересов за счет постоянной информационной работы и, в конечном счете, с формированием востребованного отношения населения к развитию атомной энергетики [10].

Развитие атомной отрасли затрагивает интересы основной массы населения и ожидания заинтересованных сторон (разных групп населения) должны учитываться в процессах управления отраслью. Основные требования прописаны в нормах МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды и российском законодательстве.



Население поддержит развитие ядерных и радиационных технологий при условии, что будет убеждено в их безопасности основанном не на заявлениях руководителей любого уровня, а на фактах, таких как, например, экспериментальные величины радиологической обстановки на атомных станциях, вывоз на переработку отработавшего ядерного топлива или работы с контейнерами для его транспортировки [11 – 13]. Подготовлен набор аргументов для разных категорий населения в пользу развития атомной энергетики [14]. Достаточно убедительны видеоролики или фотографии, показывающие как было «до» и как стало «после» на примерах ликвидированного объекта ядерного наследия или несоответствующего действующим нормам места хранения отходов, «зеленой лужайки» на месте бывшего ядерно- и радиационно-опасного объекта и др. Изучать научные публикации население не будет, но прислушается к мнению журналистов, педагогов, депутатов, т.е. к авторитетным категориям населения, которым следует знакомиться с этими первоисточниками.

При экспорте новых ядерных технологий следует учитывать, что понятия «экспорт» и «импорт» неразрывно связаны, успешный экспорт быстрых реакторов подразумевает не только успехи в стране-экспортере, но и готовность страны-импортера приобрести такой реактор. Для успешной реализации любой программы, в частности глобального обеспечения энергией, требуются выполнение необходимых и достаточных условий.

К первому необходимому условию можно отнести назревший пересмотр основной цивилизационной парадигмы, ко второму – требования о переходе на атомную энергетику, поскольку никакие другие альтернативные источники энергии из-за малой плотности потока энергии не справятся с обеспечением человечества энергией на уровне десятка млрд. тонн нефтяного эквивалента без существенного загрязнения окружающей среды. Достаточным условием можно считать такое отношение населения к атомной энергетике, при котором оно будет не только поддерживать, но и требовать от руководства государства строительства или приобретения на международном рынке атомных, а не углеводородных станций.

### **Заключение**

Таким образом, развитие ядерных и радиационных технологий с быстрыми реакторами с замкнутым топливным циклом позволит ответить на наиболее серьезные вызовы современности и, возможно, станет одной из движущих сил развития. Кратно снизятся выбросы в атмосферу углекислого газа и потребление кислорода, существенно снизится добыча углеводородных энергоносителей (угля, нефти и газа) с соответствующими промышленными отходами, уменьшится потребность в добыче природного урана и расширится топливная база энергетики на несколько столетий. Замкнутый ЯТЦ позволит задействовать накопленный за последние десятилетия запас урана-238, хранящийся сейчас в виде обедненного гексафторида урана.

### *Использованные источники:*

1. Горин Н.В., Екидин А.А., Головихина О.С. Атомная энергетика в национальных проектах России // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 1. – С. 5-15 DOI 10.26583/npe.2021.1.01
2. Моисеев Н.Н. О необходимости экологического социализма. [Электронный ресурс]. URL: <https://regnum.ru/news/society/2951381.html> (дата обращения 06.03.22)
3. Данилов-Данильян В.И. Устойчивое развитие и нескончаемые дискуссии о нем // Экологический ежегодник. – 2008. – №2. – С. 6–13.
4. Быстрый реактор с высокой избыточной наработкой делящихся нуклидов в двухкомпонентной ядерной энергетике с U-Pu и Th-U-Pu топливным циклом / П.Н. Алексеев, Е.А. Андрианова, В.Ю. Бландинский [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2020. – выпуск 5. – С. 53–65.
5. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. Под общей редакцией проф. Е.О. Адамова. Москва. Издательство АО «НИКИЭТ». 2020.



6. Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В., Смирнов В.С., Лопаткин А.В., Лемехов В.В., Моисеев А.В. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129, – выпуск 4. – С. 185-194.
7. Горин Н.В., Волошин Н.П., Чуриков Ю.И., Чебесков А.Н., Кучинов В.П., Васильев А.П., Моисеев А.В., Шепелев С.Ф., Скворцов Д.А., Журин С.И., Шидловский В.В., Кривцов А.В. Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом // Атомная энергия. – 2021, – Т.130, – выпуск 1. – С. 48-51.
8. Горин Н.В., Карманов А.Л., Первиненко В.Н., Власов В.В., Теплых Н.А., Кучинов В.П., Чебесков А.Н., Шидловский В.В. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортёром быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ // Атомная энергия, – 2021, – Т.131, – выпуск 4. – С. 227-232.
9. Горин Н.В., Кузнецов Е.В., Кучинов В.П., Чебесков А.Н., Моисеев А.В., Шидловский В.В., Кривцов А.В. Барьеры на путях ядерного распространения при экспорте российских быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (на примере БРЕСТ ОД-300) // Вестник НЯЦ, – 2021. – выпуск 4(88). – С. 16-21.
10. Горин Н.В., Абрамова Н.Л., Нечаева С.В., Головихина О.С. Воспитание у населения востребованного отношения к атомной энергетике // Государственное управление. Электронный вестник. – 2021. – № 87. – С. 7-18. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18
11. Панченко С.В., Линге И.И., Сахаров К.В., Воробьева Л.М., Мелихова Е.М., Уткин С.С., Крышев И.И, Сазыкина Т.Г., Гераськин С.А. Радиологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. – Москва: «САМ полиграфист», 2015. – 296 с.
12. Анфалова О.В., Горин Н.В., Краев В.С. Вывоз ОЯТ реакторов АМБ-100 и АМБ-200 Белоярской АЭС на ПО Маяк // Вопросы радиационной безопасности. – 2019, – № 2. – С. 47-52.
13. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Чернухин Ю.И. — Обоснование ядерной и радиационной безопасности контейнера для отработавших ТВС реакторов АМБ Белоярской АЭС // Атомная энергия, – 2006. – т.100. – выпуск 6. – С.423-428.
14. Горин Н.В., Кучинов В.П., Екидин А.А., Декусар В.М., Моисеев А.В., Шидловский В.В. Аргументы для формирования поддержки атомной энергетике в обществе. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 119–133. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.10>

## **ТРЕТЬЯ МИССИЯ УНИВЕРСИТЕТА: РАЗВИТИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ ПРАКТИК ПРИВЛЕЧЕНИЯ МОЛОДЕЖИ В ЗАКРЫТЫЕ ГОРОДА РОСАТОМА**

Линник О.В., Певнева Н.А.

*ФГБОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.*

### **Аннотация**

Рассматривается опыт СФТИ НИЯУ МИФИ по привлечению талантливой молодежи в закрытые города контура Росатома в рамках разработанной в вузе системы ранней профориентации «Открой себе/себя в МИФИ»

### *Ключевые слова:*

Росатом, ЗАТО, МИФИ, Люди и города, ранняя профориентация, кадры для Росатома

## **THE THIRD MISSION OF THE UNIVERSITY AS A DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL AND SOCIAL PRACTICES FOR ATTRACTING YOUNG PEOPLE TO THE CLOSED CITIES OF ROSATOM**

Linnik O. V., Pevneva N.A.

*Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI,  
Chelyabinsk region*

### *Abstract*

The article considers the experience of the SFTI of the MEPHI National Research University in attracting talented youth to the closed cities of the Rosatom contour within the framework of the university's early career guidance system "Discover yourself/yourself in MEPHI"

### *Keywords:*

Rosatom, BUT, MEPHI, People and cities, early career guidance, personnel for Rosatom

По данным программы развития территорий присутствия Росатома «Люди и города» до 2030 г., направление «Образование лучшего качества», лишь 3,2% старшеклассников ориентированы на работу в закрытых городах контурах Росатома, при этом большинство действующих отраслевых и муниципальных программ направлено на снижение процента образовательной миграции из ЗАТО (закрытых административных территориальных образований). Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ видит решение проблемы не в удержании немотивированной молодежи, а в привлечении мотивированной на работу в атомной отрасли талантливой молодежи посредством реализации системы ранней профориентации «Открой себе/себя в МИФИ». С 2017 года доля иногородних студентов в СФТИ НИЯУ МИФИ (ЗАТО г. Снежинск, Челябинская область) резко увеличилась и составляет около 40%.

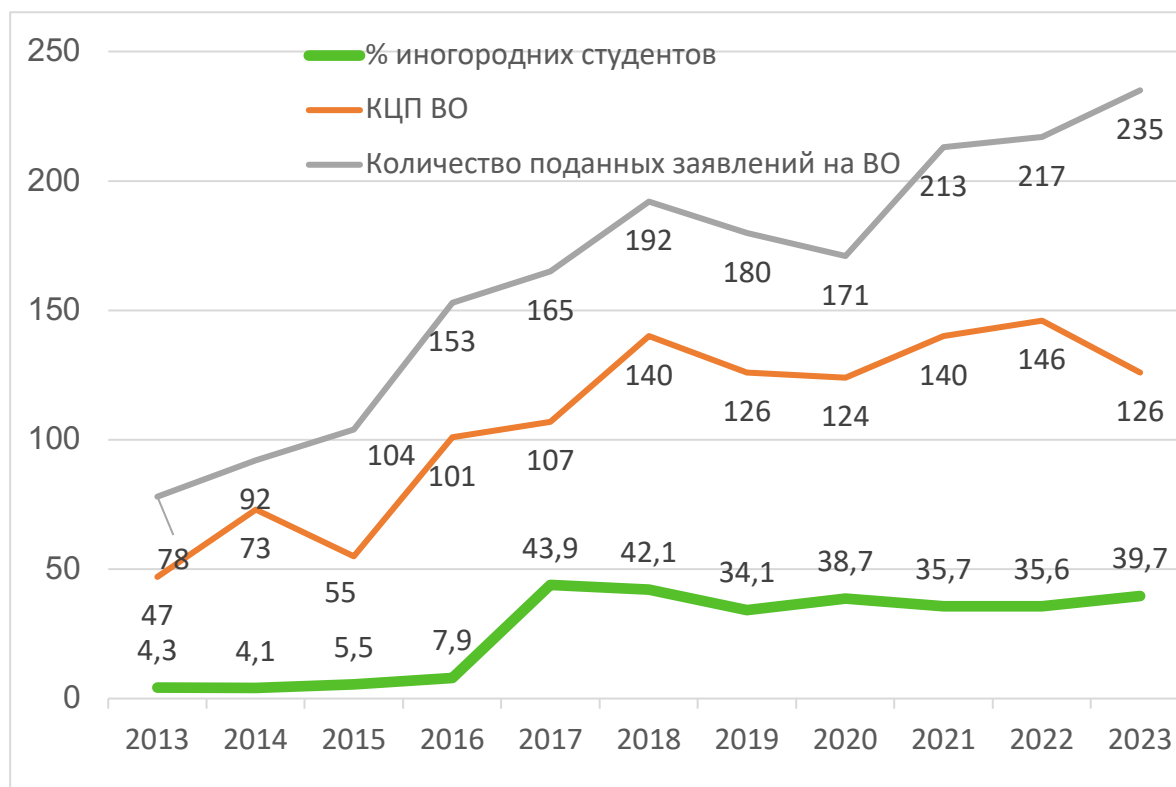


Диаграмма 1. Процент иногородних студентов, обучающихся в СФТИ НИЯУ МИФИ

В этот же период в вузе увеличилось количество контрольных цифр приема на все уровни образования, рост составил почти 3 раза. Не смотря на снижение собственной абитуриентской базы в ЗАТО, у вуза также в три раза выросла численность как абитуриентов, подающих заявления (в 3 раза по программам высшего образования), так и качество. Если в 2014 г. средний балл ЕГЭ поступивших на технические специальности составлял 60,7 балла, то в 2022 году он составил 66,6 баллов. При том, что вуз не практиковал ЕГЭ по выбору, для зачисления на специальности требовалось строго ЕГЭ по физике [1].

Рост абитуриентской базы СФТИ НИЯУ МИФИ произошел благодаря росту как численности, так и географии иногородних абитуриентов. СФТИ НИЯУ МИФИ за последние 7 лет стал точкой притяжения студентов из 28 субъектов Российской Федерации. Качество абитуриентов – один из ключевых показателей официального мониторинга эффективности вузов, ежегодно проводимого Министерством науки и высшего образования РФ. Из 1200 вузов и филиалов РФ, СФТИ НИЯУ МИФИ входит в первую лигу и занимает 56 место среди вузов России. Является единственным из филиалов НИЯУ МИФИ который пять лет подряд удерживает лидерскую позицию среди вузов своего региона (в данном случае - Челябинской области) в мониторинге эффективности Министерства науки и высшего образования РФ[2]. Является самым крупным филиалом НИЯУ МИФИ Урало-Сибирского региона (1200 студентов и 1300 обучающихся ДПО) [3].

Формировать кадровый суверенитет под технологические вызовы страны помогает разработанная, апробированная и действующая в СФТИ НИЯУ МИФИ система ранней профориентации «Открой себе/себя в МИФИ», которая представляет собой комплекс взаимосвязанных мероприятий, основанных на качественном образовательном сопровождении и личном примере студентов-наставников.

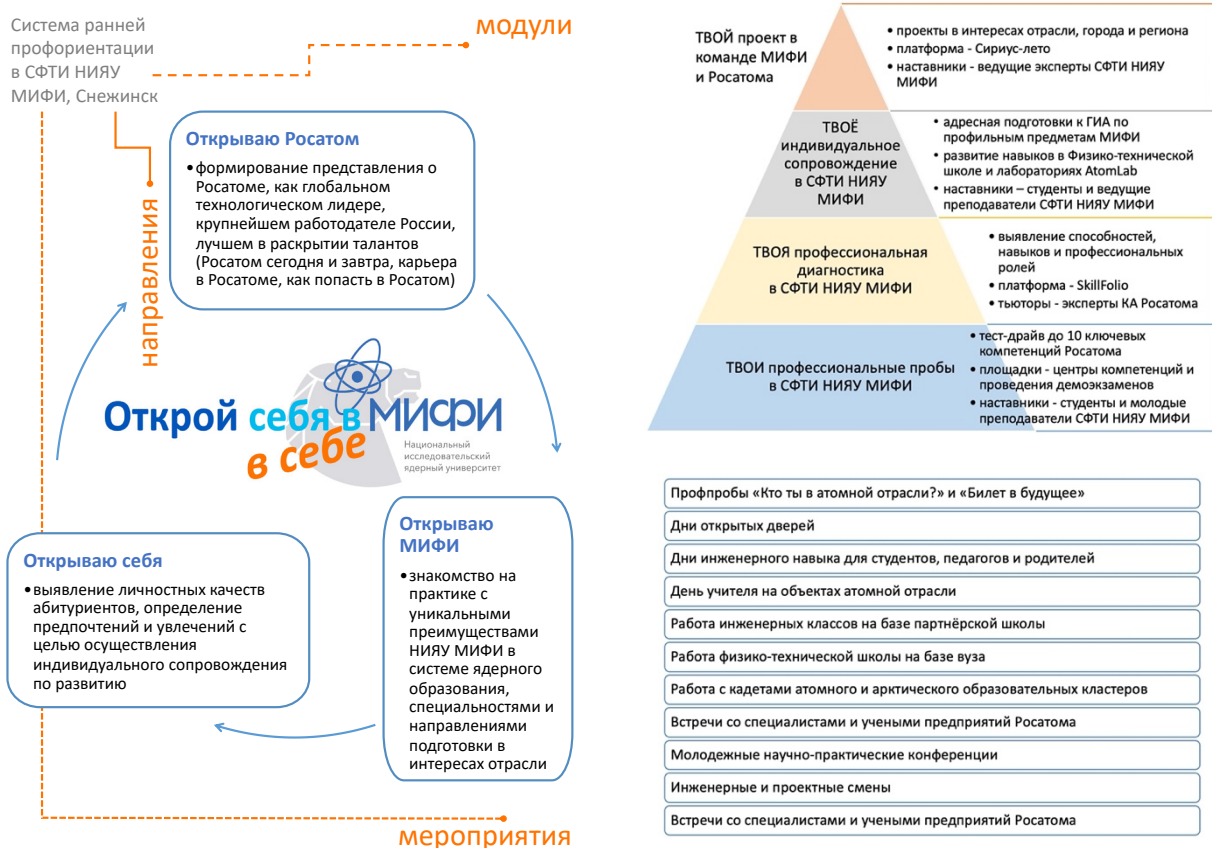


Рис. 1. Система ранней профориентации в СФТИ НИЯУ МИФИ, Снежинск.

Система ранней профориентации «Открой себе/себя в МИФИ», которая решает воспитательные, развивающие и обучающие задачи через мероприятия ранней профориентации, в том числе, цикл профессиональных проб, учебные проекты профориентационной направленности и профориентационный нетворкинг (взаимодействие ребенок-родитель-работодатель).

Комплекс взаимосвязанных мероприятий системы ранней профориентации «Открой себе/себя в МИФИ» является не только инструментом закрытия кадровой потребности заказчиков, но и реальной возможностью реализации успешного сценария профессионального становления растущего человека, способствует развитию у молодежи представлений о профессионализме россиянина, о его профессионально технологической культуре, как о центральных факторах, обеспечивающих мировую конкурентоспособность отечественной экономики [4].

СФТИ НИЯУ МИФИ развивает профориентационно-значимые компетенции абитуриентов, в том числе, у незадействованных ранее в системе профориентации категорий - талантливых кадетов (альтернатива для получения высшего образования в интересах обороноспособности страны), обучающихся школ из удаленных территорий (доступность качественного инженерного образования), детей на домашнем обучении, раскрывая образовательный потенциал НИЯУ МИФИ и карьерный – атомной отрасли. Для работы с каждой из категорий абитуриентов имеется собственная сеть партнеров и выстроенная система взаимодействия, а для каждой из целевых аудиторий применяются адресные форматы профориентации.

Создание на базе СФТИ НИЯУ МИФИ Центра образовательных и социальных практик привлечения молодежи в закрытые города Росатома позволит объединить в ранней профориентации успешные апробированные наработки с отраслевой ресурсной базой, заручившись при этом поддержкой заинтересованной родительской и педагогической общественности.

Опыт СФТИ НИЯУ МИФИ позволяет организовать практическую работу с незадействованными ранее в системе профориентации категориями - талантливыми кадетами (альтернатива для получения высшего образования в интересах обороноспособности страны), обучающимися школ из удаленных территорий (доступность качественного инженерного образования), детьми на домашнем обучении, раскрывая образовательный потенциал НИЯУ МИФИ и карьерный – атомной отрасли.

Для работы с каждой из категорий абитуриентов имеется собственная сеть партнеров и выстроенная система взаимодействия, а для каждой из целевых аудиторий применяются адресные форматы профориентации.



Рис. 2. Взаимодействие СФТИ НИЯУ МИФИ с партнерами и целевой аудиторией в рамках системы ранней профориентации «Открой себе/себя в МИФИ»

Центр образовательных и социальных практик привлечения молодежи в закрытые города Росатома на базе СФТИ НИЯУ МИФИ позволит:

1. Создать специализированную отраслевую структуру для профориентации
2. Увеличить количество профессионалов-профориентаторов
3. Увеличить количество качественных профориентационных активностей
4. Увеличить охват потенциальных абитуриентов вузов ЗАТО
5. Стать гарантией кадровой обеспеченности предприятий Росатома в ЗАТО
6. Выполнить ключевые показатели программы «Люди и города» (горизонт 2020):
  - рост доли детей и молодёжи за счет снижения оттока выпускников школ и притока абитуриентов из других регионов на 10%;
  - количество студентов, изъявивших желание пройти практику/стажировку на предприятиях отрасли, 100%;
  - рост доли школьников из региона, поступивших на инженерные специальности НИЯУ МИФИ на 20%;
  - количество кадетских образовательных учреждений, участвующих в реализации проекта регионального кадетства, 100%;
  - рост количества учителей и преподавателей, изъявивших желание трудоустроится в образовательных организациях Снежинска, на 10%;
  - рост количества участников юниорского совета Росатома, выбравших профильные вузы отрасли для поступления, на 50%;
  - рост количества участников проекта в очном/онлайн формате на 50%;
  - рост количества студентов, участвующих в мероприятиях ранней профориентации, на 50%.



Концепция создания Центра образовательных и социальных практик привлечения молодежи в закрытые города Росатома на базе СФТИ НИЯУ МИФИ вошла в число победителей Акселератора образовательных проектов Росатома «Миссия: Таланты» (21 декабря 2023 г. павильон «Атом», ВДНХ, Москва) [5], нашла поддержку в лице заместителя генерального директора по персоналу Госкорпорации «Росатом» Т.А. Терентьевой, которая отметила необходимость тиражирования опыта вуза по проведению мероприятий по привлечению молодежи в закрытые города, а также описания апробированных методик проведения для того, чтобы делиться ими с другими ЗАТО.

Таким образом, через эффективное развитие образовательных и социальных практик привлечения молодежи в закрытые города – точки присутствия предприятий госкорпорации «Росатом», СФТИ НИЯУ МИФИ успешно реализует третью миссию университета по развитию и укреплению регионов России. А студенчество становится устойчивым драйвером развития городских сообществ ЗАТО.

#### Использованные источники:

1. Линник О. В. Энергия лидерства/ О. В. Линник // Аккредитация в образовании. - 2023. - №4 (144). - С. 26-31
2. Информационно-аналитические материалы по результатам проведения мониторинга эффективности деятельности образовательных организаций высшего образования 2023 года. Снежинский физико-технический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» // Главный информационно-вычислительный центр : официальный сайт. –URL: [https://monitoring.miccedu.ru/iam/2023/\\_vpo/inst.php?id=10003309](https://monitoring.miccedu.ru/iam/2023/_vpo/inst.php?id=10003309) (дата обращения: 20.03.2020).
3. Подводим итоги 2023 года // СФТИ НИЯУ МИФИ : официальный сайт. –URL: <https://www.sphti.ru/подводим-итоги-2023-года/> (дата обращения: 20.03.2020).
4. Сергеев И.С., Родичев Н.Ф. Образовательная профориентация - вызов для современной профориентологии. // Инновационные процессы в высшем и среднем профессиональном образовании и профессиональном самоопределении. / Под ред. Е.Н. Геворкян, Н.Д. Подуфалова, М.Н. Стриханова. Колл. монография. М., 2023. С. 290-303.
5. Подведены итоги суперфинала Акселератора образовательных проектов Росатома: 7 представленных проектов будут реализованы уже в следующем году // АТОМ Медиа : официальный сайт. –URL: <https://atommedia.online/2023/12/22/podvedeny-ityogi-superfinala-akseler/?ysclid=lqklj3d2jl13994796> (дата обращения: 20.03.2020).



## ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ В ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ

Логутов К.Д.

ГБОУДО «Дворец творчества детей и молодежи имени А.П.Гайдара», Москва  
[klogutov@mail.ru](mailto:klogutov@mail.ru)

Аннотация: современное образование находится в постоянном состоянии трансформации, а дополнительное образование для детей и молодежи становится неотъемлемой частью этой эволюции. В данной статье рассматривается программа предпрофессионального образования «Лаборатория инженера-атомщика».

*Ключевые слова:* предпрофессиональное образование, дополнительное образование, атомная отрасль

## PRE-PROFESSIONAL TRAINING FOR THE NUCLEAR INDUSTRY IN ADDITIONAL EDUCATION

Logutov K.D.

SBEIAE “The palace of creativity of children and youth of A.P. Gaidar”, Moscow

Abstract: Modern education is in a constant state of transformation, and additional education for children and youth is becoming an integral part of this evolution. This article explores the pre-professional education program “Engineer-Atomist Laboratory”.

*Keywords:* pre-professional education, additional education, nuclear industry

Дополнительное образование для детей играет ключевую роль в современной образовательной системе, открывая перед ними множество возможностей для раскрытия своего потенциала, углубления знаний и погружения в увлекательные области, выходящие за пределы школьной программы. Это включает в себя разнообразные виды занятий, такие как искусство, спорт, наука и техника.

Одной из главных целей дополнительного образования является стимулирование интересов детей, развитие их способностей в узких областях, расширение кругозора и подготовка к будущей карьере.

С развитием технологий и появлением новых средств обучения идеи для программ дополнительного образования могут возникать из желания интегрировать эти новые инструменты в учебный процесс. Например, использование виртуальной реальности, обучение робототехнике или программированию могут стать значимыми элементами образовательной программы. Отслеживание общественных трендов и интересов также может послужить источником вдохновения для создания программ с художественной направленностью, таких как искусство в стиле стрит-арт.

Идеи для создания программ дополнительного образования могут также возникать из ключевых научных областей, таких как космос, экология, медицина, искусственный интеллект, энергетика и другие. Это стремление понять и исследовать эти области науки может вдохновить образовательные учреждения на создание соответствующих программ для молодежи, способствуя развитию их интересов и способностей в этих увлекательных и перспективных сферах знаний.

Необходимость формирования общественной приемлемости и востребованности атомной энергетики вызвана наличием у части населения стойкой боязни как атомной энергии, так и всей деятельности атомной отрасли и Госкорпорации «Росатом». Непонимание общественностью вопросов техногенной безопасности в отрасли тормозит развитие атомной энергетики. Конечно, быстро обучить атомным технологиям, атомной энергетике, радиационной безопасности нельзя. Но можно и нужно поступить по-иному: компактно,

структурированно и наглядно изложить важнейшие сведения в серии научно-популярных материалов.

Опыт разработки программ дополнительного образования для детей показывает, что некоторые основы дисциплин «Дозиметрия», «Ядерное и радиационное нераспространение» могут и быть доступны для детей школьного возраста и вызывают у них интерес, дают им опыт практики и распространения знаний, достоверной научной информации о радиации и техногенной безопасности. Так и появилась идея в создании программы предпрофессионального образования «Лаборатория инженера-атомщика».

Дополнительная общеобразовательная общеразвивающая программа «Лаборатория инженера-атомщика» прошла успешную апробацию в Государственном бюджетном общеобразовательном учреждении города Москвы «Дворец творчества детей и молодежи имени А.П.Гайдара» и способствует решению актуальных для дополнительного образования задач:

- связи теоретического содержания и практик;
- согласования целей и условий обучения детей с кадровыми потребностями реального сектора экономики;
- интеграции результатов дополнительного и школьного образования;
- усиления воспитания в содержании, технологиях и результатах дополнительного образования детей.

Учебный курс включает следующие модули: физика атома и атомного ядра, основы радиохимии и радиационной химии, основы радиозащиты, история атомной отрасли, проектная деятельность. Программа рассчитана на 72 часа.

Также помимо решения стандартных задач по ядерной физике, ребятам предлагается решить сложные, но интересные кейсы с использованием компьютеров и дозиметров. С 2023 года программа дополнительного образования принимает участие в проекте «Виртуальный образ великого ученого» в павильоне «Атом». В рамках этого проекта обучающиеся получают информацию об известных ключевых фигурах в области атомной науки, включая тех, кто играл важную роль в создании атомного проекта СССР и развитии атомной отрасли в целом. Эта информация затем используется для создания голограммы ученого. В текущем учебном году мы работаем над созданием голограммы И.В. Курчатова.

Курс «Лаборатория инженера-атомщика» является одной из ступеней в профориентации детей. Он позволяет учащимся погрузиться в детали новых для них профессий, востребованных для атомной отрасли.

Программа, соответствующая всем нормативным требованиям и идеологии Концепции развития дополнительного образования России на период до 2030 года, может обеспечить знакомство детей с основами атомных технологий, атомной энергетики, радиационной безопасности, преодолеть атомную необразованность и сформировать осознанное доверие к отрасли, побудить интерес детей к построению собственных путей в профессии передового настоящего и будущего, воспитать их патриотами своей страны.

#### *Использованные источники:*

1. Логотов К.Д. Программа предпрофессионального образования «Лаборатория инженера-атомщика» // Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции Научной сессии НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии». - Москва - Снежинск, 2023. С. 59-61
2. Методические материалы Инженерных классов [Электронный ресурс]: URL: <https://profil.mos.ru/inj.html> (Дата обращения: 12.01.2024)
3. Промежуточные результаты по проекту "Виртуальный образ великого ученого" представлены! // Дворец творчества имени А.П. Гайдара: официальная группа ВК URL: [https://vk.com/wall-102519762\\_8407](https://vk.com/wall-102519762_8407) (Дата обращения: 31.01.2024)

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «АТОМНАЯ АЗБУКА»

Логутов К.Д.

ГБОУДО «Дворец творчества детей и молодежи имени А.П.Гайдара», г. Москва  
[klogutov@mail.ru](mailto:klogutov@mail.ru)

Аннотация: "Атомная азбука" представляет собой образовательную программу, ориентированной на детей младшего школьного возраста и направлена на изучение основ естественных наук, включая физику, с использованием интерактивных методов и практических занятий. В рамках программы дети и их родители активно участвуют в проведении экспериментов, выполнении практических заданий и обсуждении учебного материала, что способствует более глубокому усвоению материала, формированию интереса к науке с самого раннего возраста и развитию позитивного отношения к обучению.

*Ключевые слова: атомная отрасль, дополнительная образовательная программа, атомная станция, радиафобия*

## IMPLEMENTATION OF THE PROGRAM OF ADDITIONAL EDUCATION "ATOMIC ALPHABET"

Logutov K.D.

*SBEIAE "The palace of creativity of children and youth of A.P. Gaidar", Moscow*

Abstract: the Atomic Alphabet program is aimed at primary school children and is aimed at learning the basics of natural sciences, including physics, using interactive methods and practical exercises. Within the framework of the program, children and their parents actively participate in conducting experiments, performing practical tasks and discussing educational material, which contributes to a deeper assimilation of the material, the formation of interest in science from an early age and the development of a positive attitude to learning.

*Keywords: nuclear industry, additional educational program, nuclear power plant, radiophobia*

Программа "Атомная азбука" представляет собой важный шаг в формировании общественной приемлемости и востребованности атомной энергетики. Необходимость в таких усилиях обусловлена наличием у части населения стойкой боязни как атомной энергии, так и всей деятельности атомной отрасли и Госкорпорации «Росатом». Непонимание общественностью вопросов техногенной безопасности в отрасли тормозит развитие атомной энергетики.

Однако, быстро обучить население атомным технологиям, атомной энергетике, радиационной безопасности невозможно. Но можно и нужно поступить по-иному: компактно, структурированно и наглядно изложить важнейшие сведения в серии научно-популярных материалов.

Также, изучение физики с малых лет играет ключевую роль в формировании у детей фундаментальных научных знаний и навыков, которые будут полезны им на протяжении всей жизни. Физика, будучи основой многих научных дисциплин, помогает развивать у детей логическое мышление и аналитические способности. Они учатся анализировать причинно-следственные связи, делать выводы на основе экспериментов и наблюдений, а также принимать обоснованные решения.

Изучение физики также помогает детям понять и интерпретировать различные явления и процессы, происходящие в окружающем мире. Они узнают, как работают механизмы

движения, как происходит передача тепла и энергии, как функционируют электричество и магнетизм. Это способствует формированию у них более глубокого и осознанного взгляда на окружающий мир и его законы.

Программа "Атомная азбука" в Москве, реализуемая на базе Дворца творчества детей и молодежи имени А.П. Гайдара с 2021 года, представляет собой необычный подход к обучению детей основам естественных наук. За два года реализации этой программы были замечены значительные улучшения как в методике преподавания, так и во вовлечении родителей.

В первый год работы программы основное внимание уделялось демонстрации принципов естественных наук через проведение интерактивных опытов, экспериментов и создание наглядных материалов. Каждая буква алфавита представляла собой отдельную тему, к которой дети получали доступ через презентации и практические занятия. Это позволило детям увлеченно и с пониманием воспринимать новый материал.

На второй год программы был усилен теоретический блок, а также скорректированы сценарии занятий в соответствии с обратной связью от обучающихся. Это позволило сделать учебный процесс более глубоким и интересным, а также более адаптированным к потребностям детей.

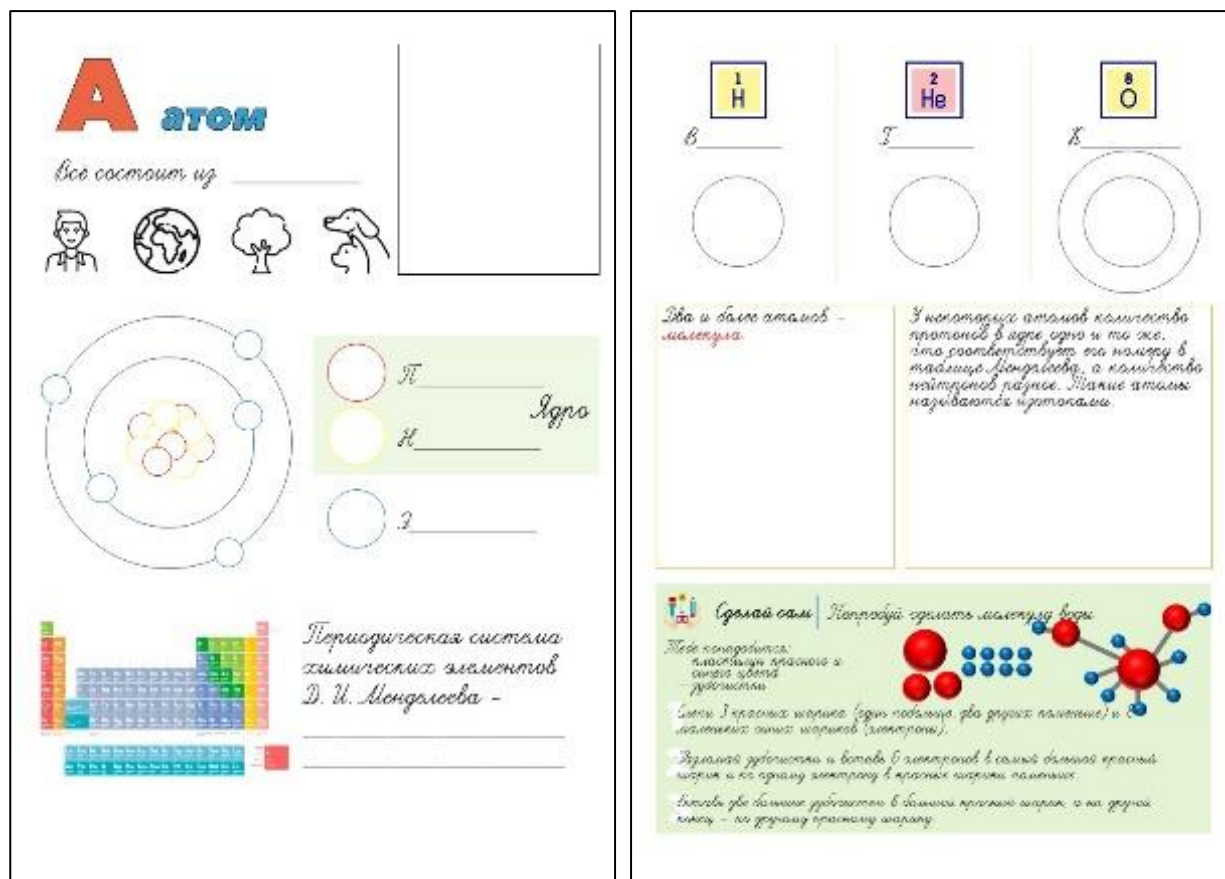


Рисунок 1 – Пример рабочего листа

Важным изменением стала внедренная система структуризации знаний, представленная в виде рабочих листов (рис. 1). На каждом занятии дети получают такие листы, на которых им предстоит дописывать или дорисовывать материалы по ходу урока. Это помогает им закреплять изученный материал и создавать свою первую энциклопедию, страницы которой в конце учебного года сшиваются в книгу. Такой подход стимулирует детей к активному участию в уроке и помогает им лучше усваивать изученный материал. Кроме того, в конце каждого занятия дети получают возможность вклеить наклейку с соответствующей буквой в свой рабочий лист, что помогает им визуально оформить и закрепить изученный материал.

Немаловажным результатом программы является увеличение интереса и вовлеченности родителей. Рабочие листы оказались эффективным инструментом для привлечения внимания родителей к образовательному процессу и позволили им более активно участвовать в обучении своих детей.

Родители становятся активными участниками образовательного процесса, поддерживая и помогая детям в проведении опытов и экспериментов. Это не только позволяет ребенку лучше понять материал и закрепить полученные знания, но и укрепляет взаимосвязь между ребенком и его семьей.

Таким образом, программа дополнительного образования "Атомная азбука" не только стимулирует интерес детей к естественным наукам, но и улучшает образовательный процесс в целом, сделав его более интерактивным, увлекательным и вовлекающим для всех участников.

*Использованные источники:*

1. Логутов К. Д., Певнева Н. А., Садовский А. А. Безопасный атом: разработка материалов по знакомству с атомной отраслью для дошкольников и младших школьников// Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2020. Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции СФТИ НИЯУ МИФИ. - 2020. - С. 223-225.
2. Логутов К. Д., Певнева Н. А., Формирование интереса к атомной отрасли у младших школьников// Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2022. Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции СФТИ НИЯУ МИФИ. - 2022. - С. 173-175.
3. Садовский, Александр Алексеевич. Культура техногенной безопасности в атомной отрасли: Сборник материалов. - Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 140 с.
4. Атомная азбука [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://myatom.ru/wp-content/uploads/games/aes/abc/> (дата обращения: 30.08.21)



## **ЛАБОРАТОРИЯ «ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ» КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ПРИВЛЕЧЕНИЯ ШКОЛЬНИКОВ К ИЗУЧЕНИЮ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Баширова И.А., Сергеев Н.А.  
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.,  
[p.i.e@yandex.ru](mailto:p.i.e@yandex.ru)

На кафедре Технической механики СФТИ НИЯУ МИФИ создана лаборатория «Инженерного мышления». Разработаны обучающие методики, позволяющие эффективно решать задачу привлечения школьников к изучению инженерных специальностей.

*Ключевые слова: инженерное мышление, обучающие методики, профориентация.*

## **LABORATORY OF "ENGINEERING THINKING" AS AN EFFECTIVE MEANS OF ATTRACTING OF SCHOOLCHILD TO STUDY ENGINEERING SPECIALTIES**

Parshukova N.Yu., Shishkin N.Ya., Bashirova I.A., Sergeev N.A.  
*Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University*  
MEPhI  
[p.i.e@yandex.ru](mailto:p.i.e@yandex.ru)

A laboratory of "Engineering Thinking" has been created at the Department of Technical Mechanics of the SFTI of the National Research University MEPhI. Educational methods have been developed to effectively solve the problem of attracting of schoolchild to study engineering specialties.

*Keywords: engineering thinking, teaching methods, career guidance.*

В последние годы во многих регионах России наблюдается острый дефицит инженерных кадров, обладающих развитым техническим мышлением, способных обеспечить подъём инновационных высокотехнологичных производств [1]. В связи с этим подготовка высококвалифицированных кадров для промышленности на основе развития инженерного образования является стратегической задачей государственного уровня, приоритетным направлением развития страны [2].

При поступлении в среднее профессиональное или высшее учреждение на инженерную специальность у абитуриента уже должны быть сформированы элементы инженерного мышления. Вследствие чего возникает проблема в организации такой специально направленной траектории обучения ещё до выбора профессиональной деятельности [3]. Для выполнения этой задачи необходимо привлекать школьников старших классов к изучению инженерных специальностей и формировать у них инженерное мышление.

С целью решения данной проблемы на кафедре Технической механики СФТИ НИЯУ МИФИ была создана лаборатория «Инженерного мышления» для учащихся 5-11 классов. Лаборатория, имеет всё необходимое оборудование для проведения занятий. Разработаны обучающие методики, методические пособия, сборники заданий для проведения тематических занятий и профессиональных проб по направлению «Инженерное мышление», а также модели (конструктор) для решения этих задач [4-9].



Данная лаборатория стала площадкой для проведения профессиональных проб. В ней студенты СФТИ НИЯУ МИФИ и руководители проводят занятия с обучающимися инженерных классов МБОУ СОШ №125 и №135 г. Снежинска.

На данный момент было проведено более 10 профессиональных проб и множество тематических занятий. В профессиональных пробах применяются различные методы и формы работы: проблемная задача, моделирование, эксперимент, анализ вариантов решений, коллективное обсуждение и др. Учащиеся имеют возможность решать реальные задачи, пробовать себя в различных ролях, критически мыслить, сотрудничать и демонстрировать свои способности в практической деятельности.

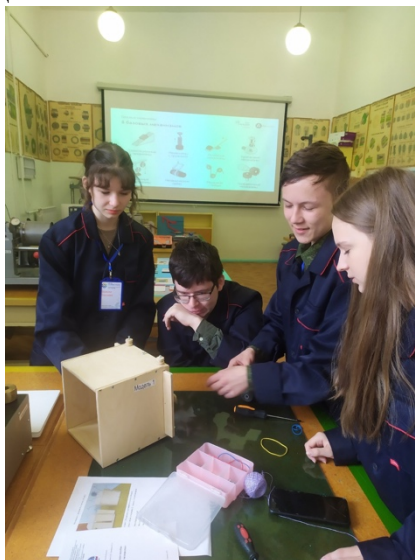


Рисунок 1 – Профессиональные пробы по направлению «Инженерное мышление. Каракури»

Кроме решения конструкторских задач, разработанные методики способствует развитию у школьников целого ряда дополнительных навыков, таких как аналитическое и практическое мышление, работа в коллективе, коммуникация, умение принимать решения и другие. Занятия в лаборатории «Инженерное мышление» позволяют школьникам определить свои интересы и склонности, а также выбрать будущую профессию.

Данную программу возможно реализовать при минимальном вложении ресурсов, при этом добиваясь хороших результатов.

После всех проведенных занятий можно отметить, что разработанная методика позволяет формировать у школьников устойчивые знания и навыки в области моделирования и конструирования, создаёт условия для более глубокого восприятия и усвоения учебного материала, а также привлекает будущих абитуриентов к поступлению на инженерные специальности.

*Использованные источники:*

1. Волосовец Т.В., Карпова Ю.В., Тимофеева Т.В. Парциальная образовательная программа дошкольного образования «От Фрёбеля до робота: растим будущих инженеров»: учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Самара: Вектор, 2018.
2. Материалы XXIV Международной научно-практической конференции «Современное технологическое образование»/ Под ред. Хотунцева Ю.Л. Москва: МПГУ, 2018
3. Баширова И.А., Тагиров А.С., Маркова С.А., Чиркина М.П., Шишкин Н.Я. Развитие инженерного мышления // Ассамблея студентов и школьников: Молодежь – будущее атомной промышленности России. Сборник научных трудов. XVI научно-практическая конференция. 17-18.12.2022, Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С.11-12.
4. Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Баширова И.А. Методическое пособие «Развитие инженерного мышления» - Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ. 2023.

5. Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Баширова И.А. Методическое пособие «Базовые механизмы» - Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ. 2023.
6. Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я. Сборник заданий по направлению «Инженерное мышление. Каракури» - Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ. –2022.
7. Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Баширова И.А. Сборник заданий по направлению «Инженерное мышление. Каракури» (схемы, чертежи, задачи) - Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ. 2023.
8. Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Баширова И.А. Сборник заданий по направлению «Инженерное мышление. Каракури» (модели из разных материалов) - Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ. 2023.
9. Паршукова Н.Ю., Певнева Н.А., Шишкин Н.Я., Баширова И.А., Тагиров А.С., Чиркина М.П., Маркова С.А. Профессиональная проба - Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ. -2023.

## ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Садовский А.А.

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.  
[a.a.sadovskiy@gmail.com](mailto:a.a.sadovskiy@gmail.com)*

## SECURITY ISSUES IN THE TRAINING OF SPECIALISTS FOR THE NUCLEAR INDUSTRY

Sadovsky A.A.

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University  
MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk Region*

Рассматривается риск-ориентированный подход в вопросах безопасности. Приводятся требования технических регламентов к продукции и услугам. Отмечены особенности обеспечения безопасности на объектах атомной отрасли. Определены составляющие культуры безопасности. Приведен перечень дисциплин, включающих вопросы безопасности.

Ключевые слова: **безопасность, мера риска, технические регламенты, ядерная и радиационная безопасность, культура безопасности.**

В соответствии с Конституцией РФ в Российской Федерации охраняются труд и здоровье людей, обеспечиваются условия, соответствующие требованиям безопасности и гигиены. Что такое безопасность? Это – частичное или полное отсутствие опасности. Полное отсутствие опасности от любого действующего объекта или системы – невозможное событие. Существует количественная мера, позволяющая характеризовать безопасность, – риск  $R$  некоторого события. **Риск** - количественная мера опасности, которая определяется функцией двух переменных - вероятности нежелательного события и размера убытка от него:

$$R = P \times U,$$

где переменная  $P$  - это вероятность аварии (нежелательного события),  
а  $U$  - это размер ее последствий (убыток).

Переменная  $P$  – число, относится к интервалу числовых значений от 0 до 1, т.е. это величина, которая не имеет размерности,

$U$  измеряют или деньгами, или количеством погибших или пострадавших (персонал и население).

Мерой риска в обществе часто становится цена жизни человека. Так события, в результате которых один несчастный случай со смертельным исходом происходят на один миллион людей, обычно не замечаются в обществе (вероятность возникновения  $P(t) = 10^{-6}$ ) - малый риск, а события, которые имеют частоту летального исхода  $P(t) = 10^{-3}$  - очень большой риск, расцениваются как несчастные случаи.

Федеральный закон РФ от 27 декабря 2002 года № 184 - ФЗ «О техническом регулировании» устанавливает правовое регулирование отношений в трех областях:

- установление обязательных требований к продукции, влияющим на безопасность продукции - **технические регламенты;**

- установление на добровольной основе требований к продукции – **стандарты;**

- оценка соответствия – **сертификация, декларирование.**

Технические регламенты с учетом степени риска причинения вреда устанавливают минимально необходимые требования, обеспечивающие безопасность продукции.

Однако, в отношении оборонной продукции, продукции (работ, услуг) и объектов, связанной с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии требования устанавливаются отдельными нормативно-правовыми документами.

На основе рекомендаций МАГАТЭ и практики мирового сообщества глобальная ядерная безопасность формируется тремя направлениями по обеспечению безопасности ядерных объектов – законодательное (Safeguard), технико-технологическое (Safety) и роль человеческого фактора (Security), единство которых и составляет основу культуры безопасности в атомной отрасли.

По направлению **Safeguard** в Российской Федерации на основе законов «Об использовании атомной энергии», «О радиационной безопасности населения», «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» разработаны нормы и правила радиационной безопасности (НРБ-99 и ОСПОРБ-99), а из них формируются методические указания различного уровня.

По направлению **Safety** разработана общая программа обеспечения качества АС – ПОКАС (О) применяется для атомных станций или блоков АС, регламентирует деятельность эксплуатирующих организаций и подрядных организаций, оказывающих услуги для эксплуатирующей организации АС в соответствии с политикой в области обеспечения качества. Поколения ядерных энергетических реакторов (ЯЭР) подразделяются в зависимости от их основного свойства – ядерная и радиационная безопасность.

Для предприятий ядерно-оружейного комплекса (ЯОК) при сертификации (подтверждения соответствия) систем менеджмента качества помимо требований стандарта ГОСТ ISO 9001-2015 особое внимание обращается на выполнение ряда дополнительных требований введенных стандартом ГОСТ РВ 0015-002-2012 применительно к СМК предприятий оборонно-промышленного комплекса.

По направлению **Security** большое внимание уделяется роли человеческого фактора в обеспечении безопасности, что учитывается в системном подходе к управлению атомными объектами.

На предприятиях Госкорпорации «Росатом» внедрена система всеобщего управления качеством (Total Quality Management – TQM) на основе международных стандартов ISO 9000. С учетом специфики деятельности к 7 базовым принципам TQM добавлены еще 2 принципа:

- обеспечение безопасности;
- учет лучших международных практик.

Выстроенная за десятилетия система обеспечения безопасности ядерных объектов опирается на следующие составляющие:

- наличие современной и эффективной нормативно-правовой базы (федеральных законов и иных законодательных актов, норм и правил обеспечения безопасности, руководств, инструкций и других документов);
- техническое обеспечение безопасности объектов (качество проектирования, строительства, эксплуатации и снятия с эксплуатации, наличие соответствующих систем контроля, управления и защиты) и наличие комплекса организационно-технических мероприятий по физической защите объектов;
- высокий уровень профессионализма персонала (квалификация, аттестация, допуск к работе, дисциплина, учёт человеческого фактора, специальные требования к состоянию здоровья персонала) и культура безопасности.

Вопросы безопасности находят отражение в ряде курсов, читаемых в СФТИ НИЯУ МИФИ: «Ядерное нераспространение», «Культура техногенной безопасности в атомной отрасли», «Организация и управление предприятием», «Методы оценки качества продукции», «Информационное пространство преподавателя инженерного вуза».

Проводятся также курсы повышения квалификации работников базового предприятия – РФЯЦ ВНИИТФ по программам: «Обеспечение физической защиты ядерных материалов и радиоактивных веществ», «Радиационная безопасность, в том числе дозиметрический контроль».

*Использованные источники:*

1. Ядерное нераспространение. Г.М. Пшакин, Н.И. Гераскин и др., Уч. пособие для вузов. М. МИФИ, 2006.
3. Садовский А.А. Культура техногенной безопасности в атомной отрасли: Сборник материалов. – Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 140 с.  
(<https://yadi.sk/d/s-VbEIfzq8SF5g>)

- Абраменко И.А., 68  
Агеев Г.А. 225  
Алтынникова У.Ф., 67  
Анучин М.Г., 68  
Бабак Д.В., 71  
Бакиров А.Р., 57  
Балашов Н.М., 79  
Баранчикова А.О., 82  
Баширова И.А., 241  
Безгодов Е.В., 114, 154  
Белоусов С.В., 55  
Беляев П. Е., 84  
Блинов А.С., 87  
Бологов А.В., 9  
Борщевский М.А., 92  
Бочкарева О.Н., 241  
Боярских К.А., 90  
Брегеда А.И., 201  
Бугаенко А.А., 161  
Василенко Н.В.,  
Вершинин Д.В., 203  
Водолага Б.К., 245  
Габбасова Н.Р., 12  
Ганеева Д.Ф., 67  
Гареев И.С., 55  
Глазырин И. В., 197  
Глущенко А.Г., 57  
Гнеушев Н.В., 21  
Говрас Е. А., 197  
Голунов А.А., 9  
Горбатов А.Д., 9, 21  
Горбоконица О.И., 44  
Горин Н.В., 245  
Горский Ю.А., 203  
Грибанов Д.А., 57  
Григорьев А.Н., 92, 117, 131  
Гусев А.И., 34  
Данилов Н.Е., 102  
Долгих С.М., 57  
Доценко В.В., 87, 107  
Дудкин В.А., 125, 127  
Евсеев Г.А., 233  
Евстратов Д.С., 203  
Ежов Р.А., 15, 34, 37  
Ефимов-Сойни Н.К., 71  
Жабунина О.Ю., 87, 107  
Задворнова О.В., 17  
Михайлов Н. А., 197  
Монстаков Д.А., 125  
Мякушко Э.В., 225  
Никитин Г.И., 203  
Иванов М.В., 55  
Исанов К.А., 82  
Исупова А.А., 209  
Казаков И.А., 21, 23  
Казачинский А.О., 165  
Карелина О.А., 167  
Карзанов Ю.А., 25, 47  
Карзанов Ю.А., 47  
Каримов В.А., 26  
Каримов Р.А., 23, 26  
Кирсанов В.А., 15, 23  
Клиначева Н.Л., 151  
Ковалев Ю.М., 110  
Козлов П.В., 125  
Колесова Т.В., 28  
Кононов С.Н., 172  
Коробейников К.А., 29  
Крутова И.Ю., 161, 165, 174  
Кузнецов А.Н., 68  
Кузнецов Е.В., 245  
Кузнецова Н.А., 12  
Куприянец Т.А., 84  
Кутузова К.С., 114  
Кушнир О.С., 31  
Кушнир П.О., 31  
Латыпов А.А., 176  
Лебедев С.Н., 176  
Левунина Э.С., 191  
Линник О.В., 241, 250  
Липатов А.Н., 201  
Логутов К.Д., 255, 257  
Лубенченко Н.А., 92, 117  
Лушина Ю.Ю., 87, 107  
Лысенко О.В., 28  
Лысенко О.В., 44  
Майер А.Е., 79  
Макеева И.Р., 84, 143  
Мальцев А.А., 25  
Мантуров Г.Н., 82  
Мастюк Д.А., 67  
Мастюк Д.А., 84  
Матвеев И.В., 92  
Машкин А.Н., 212, 215  
Мельникова Н. В., 203  
Минаев А.С., 218  
Мирошкин З.К., 15, 34, 37  
Михайлов А.Ф., 222  
Никифоров М.И., 154  
Никульшин М.В., 87, 107  
Новаковский Н.С., 68  
Овечкин А.А., 176



- Орлова Н.Ю., 15, 17, 23, 34, 37  
Паршукова Н.Ю., 57, 241  
Пасюков С.Д., 114, 154  
Певнева Н.А., 241, 250  
Пигасов Е.Е., 84  
Пильщиков А.А., 15, 34, 37  
Пичугина Л.О., 47  
Поляков Е.В., 47  
Понькин Е.И., 127, 194  
Попов И.А., 114  
Пыхов В.В., 227  
Романова А.А., 212, 215  
Сагайдачная П.В., 225  
Садовский А.А., 263  
Садыков Н.Р., 138  
Саманова А.И., 42  
Сахненко О.А., 12  
Свердлов В. И., 131  
Сдобнов В.И., 57  
Станкевич А.В., 57  
Сергеев Н.А., 241  
Серебряк В.Г., 154  
Середкин Н.Н., 136  
Серигов А.С., 28, 44  
Сивков С.И., 212, 215  
Скрябин С.Н., 138  
Собко С.А., 55  
Стаканова Н.А., 47  
Стариков Я.Е., 143  
Старовойтов Н.П., 125  
Стаханов В.В., 146  
Степанов И.Ю., 29  
Строков А.Д., 117  
Суров М.С., 57  
Тараканов А.А., 146, 154  
Тебайкин Д.С., 233  
Тельгерекова С.А., 42  
Титов В.В., 87  
Титова А.М., 197  
Титова О.В., 28  
Товмасын Е.А., 87  
Тюменцев В.А., 52  
Ушков А.В., 48  
Фазлитдинова А.Г., 52  
Фёдоров В.В., 218  
Филимоненко А.Г., 55  
Хищенко К.В., 90, 136, 149  
Шайдуллин С.М., 127  
Шарапов И.К., 48  
Шахова О.А., 233  
Шершнева О.А., 151  
Шестаков М.А., 110  
Шестаковская Е.С., 143, 151  
Шишкин Н.Я., 57, 61, 241  
Шульгин А.Н., 31, 233  
Юрин Д.О., 146  
Юрченко О.С., 28  
Юсупов Ю. Ф., 197  
Яковлев С.А., 154  
Яловец А.П., 151  
Ярушин К.М., 157

## **ОРГАНИЗАЦИИ**

### **Российская Академия наук**

ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН», Москва

### **Учебные организации**

ГБОУДО «Дворец творчества детей и молодежи имени А.П. Гайдара», Москва

МБОУ «СОШ №125 с углубленным изучением математики», Снежинск, Челябинская обл.

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», Долгопрудный,  
Московская обл.

ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
г. Санкт-Петербург

ФГАОУ ВО «Технологический институт Национального исследовательского ядерного  
университета МИФИ», Лесной, Свердловская обл.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет», Челябинск, Челябинская  
обл.

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск, Челябинская обл.

### **Научно-исследовательские, производственные и другие организации**

ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская обл.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.



Материалы Заседаний  
Всероссийской конференции  
«Научная сессия НИЯУ МИФИ по направлению  
«Инновационные ядерные технологии»  
на сайте [sphti.ru](http://sphti.ru)

Статьи сборника публикуются в авторской редакции

Оригинал-макет подготовлен Н.А. Певневой

Подписано в печать 29.02.2024. Формат 60x84 1/16  
Печ. л. 10,5 Тираж 100 экз.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Каширское ш., 31.  
Издательско-полиграфический отдел СФТИ НИЯУ МИФИ  
456776, Снежинск, Комсомольская, 8