НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ – 2023,

посвященная 80-летию НИЯУ МИФИ и 65-летию СФТИ НИЯУ МИФИ

ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИОННЫЕ ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Сборник трудов конференции

Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ

31 января – 2 февраля 2023 г.

УДК 621.039 + 658.51 + 681.5
Н34

НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 31 января – 2 февраля 2023 г. - М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – 159 с.

Настоящая книга является сборником научных трудов, представленных в рамках всероссийской научно практической конференции по направлению «Инновационные ядерные технологии» ежегодной Научной сессии Национального исследовательского ядерного университета МИФИ на базе Снежинского физико-технического института НИЯУ МИФИ. Работа конференции проходят по секциям: «Технологии и материалы в наукоемком производстве», «Моделирование физических и технологических процессов», «Физико-математические и информационные проблемы инновационных технологий».

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

СОПРЕДСЕДАТЕЛЬ:
Линник О.В. - руководитель СФТИ НИЯУ МИФИ, к.и.н., доцент

Материалы получены до 20.02.2023

ISBN 978-5-7262-2953-9

© Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, 2023

Стр.

Абраменко И.А. 7
ЦИКЛЫ БРАЙТОНА, ЭРИКССОНА, СТИРЛИНГА

Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. 10
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОНЕЧНЫХ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ С ЧАСТНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ

Болдырев М.И., Глазырин И.В., Кириллов И.А., Котова О.Г., Михайлов Н.А., Симоненко В.А., Чижков М.Н., Юсупов Ю.Ф. 12
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Боярских К.А., Хищенко К.В. 16
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ВОЛЬФРАМА С ТРЕМЯ ПАРАМЕТРАМИ

Бугаенко А.А., Крутова И.Ю. 18
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА

Волосенко К.С., Полеев В.Г. 20
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ КОНТЕЙНЕРА ВЗРЫВОМ НАХОДЯЩЕГОСЯ ВНУТРИ ЗАРЯДА КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Гнеушев Н.В., Горбатов А.Д., Казаков И.А., Каримов В.А., Шишкин Н.Я., Ибрагимов Я.О. 23
ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДАННЫХ ПРИ ПЕРЕКРЕСТНОМ ИЗМЕНЕНИИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЯ

Гнеушев Н.В., Горбатов А.Д., Казаков И.А., Каримов В.А., Шишкин Н.Я., Горбатов И.В., Орлов Ю.А. 25
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДБОР РЕЖИМОВ РЕЗКИ ЛАЗЕРОМ ПОЛИЛАКТИДА

Горин Н.В., Кузнецов Е.В., Водолага Б.К., Волошин Н.П., Кучинов В.П., Декусар В.М., Моисеев А.В., Васильев А.П., Шидловский В.В. 27
АРГУМЕНТЫ ДЛЯ РАЗНЫХ КАТЕГОРИЙ НАСЕЛЕНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДДЕРЖКИ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Дьячков М.Р. 32
К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ В ДИСТАНЦИОННОМ ФОРМАТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Дьячков М.Р. 35
ВЛИЯНИЕ ФОРМ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

Захарова О.О. 38
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ РАБОЧИХ ЛИСТОВ КАК ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ИНОЯЗЫЧНОЙ КОММУНИКАТИВНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

Исупова А.А. 41
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Казачинский А.О. 45
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ТИПА ТОРНАДО

Карелина О.А., Баутин С.П., Обухов А.Г. 47
ДВУМЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ В ВИДЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ

Кононов С.Н. 53
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСЧЁТНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

Крутова И.Ю. 55
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ПРИДОННЫХ ЧАСТЯХ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА

Левунина Э.С. 57
ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ ГАЗА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СТОКА ВВЕРХ

Логутов К.Д. 59
ПРОГРАММА ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЛАБОРАТОРИЯ ИНЖЕНЕРА-АТОМЩИКА»

Машкин А.Н. 62
АНАЛИЗ БУМАЖНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕЧАТИ ЧЕРТЕЖЕЙ И КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Машкин А.Н. 71
АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ КЛАССИФИКАЦИЙ И СВОЙСТВ БУМАГИ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ПЕЧАТИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Мустафин А.М., Веселова Н.Н., Лебедев С.Н. 78
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ С ПОДВИЖНЫМИ ФАЗОВЫМИ ГРАНИЦАМИ НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМЫХ СЕТКАХ

Нагорнов А.А., Ена В.А., Федоров А.А., Козлов А.В., Бобылев А.В. 87
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С РАСКАТЫВАНИЕМ

Опрышко О.В. 92
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА В СТАЦИОНАРНОМ СЛУЧАЕ

Орлова Н.Ю., Пильщиков А.А., Ежов Р.А., Мирошкин З.К. 94
ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ ПУТЁМ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА

Орлова Н.Ю. 96
ТЕХНИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ. ПУТЬ К РЕАЛЬНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Лушина Ю.Ю. 100
РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ КОЛЕС НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПНЕВМОВЕЗДЕХОДОВ

Паршукова Н.Ю., Певнева Н.А. 103
РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВНЕДРЕНИЕ КАРАКУРИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС В ВУЗЕ

Петрова Ю.А., Садыков Н.Р., Скрябин С.Н. 105
ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ЧАСТОТУ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ НАНОЛЕНТ

Понькин Е.И. 108
ПОСТРОЕНИЕ АВТОМОДЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ИСТЕЧЕНИЕ ПОЛИТРОПНОГО ГАЗА В ВАКУУМ С КОСОЙ СТЕНКИ В НЕСОГЛАСОВАННОМ СЛУЧАЕ

Садовский А.А. 111
ЗНАЧИМОСТЬ КУРСА «ЯДЕРНОЕ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЕ» В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ БАЗОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Середкин Н.Н., Хищенко К.В. 114
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ВОЛЬФРАМА, НИКЕЛЯ И МЕДИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Симоненко В.А. 116
К ФОРМИРОВАНИЮ СБАЛАНСИРОВАННЫХ КВАНТОВО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ДОСТИЖЕНИЙ

Скрябин С.Н., Петрова Ю.А., Садыков Н.Р. 126
УРОВНИ ЭНЕРГИИ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ГЕЛИКОИДАЛЬНО СКРУЧЕННОЙ НАНОЛЕНТЕ ДЛЯ ДИРАКОВСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Стаханов В.В., Яковлев С.А., Безгодов Е.В., Попов И.А., Пасюков С.Д., Тараканов А.А. 130
ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Степанов И.Ю., Коробейников К.А., Никульшин М.В., Минаев И.В 133
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УСТАНОВКИ В ОБЛАСТЯХ КОНЦЕНТРАТОРОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Томилов Ю.А., Щенникова Е.М. 136
РАСЧЕТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА В ИНТЕРЕСАХ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Хищенко К.В. 139
ПРОСТЫЕ МОДЕЛИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЙ

Черепанов М.Е., Белая Е.А., Колмогорцев А.М. 141
ИОНООБМЕННЫЙ СИНТЕЗ $CuCrO_2$

Шишкин Н.Я., Глущенко А.Г., Суров М.С. 143
ИНИЦИИРОВАНИЕ СМЕСЕЙ ТЭНА С НАНОДИСПЕРСНЫМ АЛЮМИНИЕМ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Шульгин А.Н., Пыхов В.В., Шахова О.А., Коробейников С.В. 146
ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ

Щенникова Е.М., Томилов Ю.А. 150
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКОМБИНАЦИИ ВОДОРОДА НА КАТАЛИТИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ В ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТАЛЬНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА

Юсупов Ю.Ф., Глазырин И.В., Говрас Е.А., Михайлов Н.А., Титова А.М., Чижков М.Н. 153
ТРЁХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Алфавитный указатель авторов **156**

Организации **157**

Оргкомитет **158**

ЦИКЛЫ БРАЙТОНА, ЭРИКССОНА, СТИРЛИНГА

Абраменко И.А.
ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Свердловская обл.
vairo127@mail.ru

В докладе, на основе литературных данных, рассмотрены основные особенности термодинамических циклов Карно, Стирлинга, Эриксона и Брайтона и проведено их сопоставление. Сделан анализ их основных достоинств и недостатков. Представлены области применения в современной технике тепловых машин, разработанных на основе каждого из циклов.

Ключевые слова: циклы Стирлинга, Эриксона и Брайтона, тепловые машины, термодинамические циклы, энергетика, термодинамика, КПД.

CYCLES OF BRAIGHTON, ERIKSSON, STIRLING

Abramenko I.A.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Sverdlovsk region.
vairo127@mail.ru

In the paper, on the basis of literature data, the main features of the thermodynamic cycles of Carnot, Stirling, Erickson and Brighton are considered and their comparison is made. An analysis of their main advantages and disadvantages is made. The areas of application in modern technology of heat machines developed on the basis of each of the cycles are presented.

Key words: Stirling cycles, Erickson cycles and Brighton cycles, heat machines, thermodynamic cycles, energy, thermodynamics, efficiency.

Как известно из термодинамики, максимальный коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины достигается в процессе реализации цикла Карно, состоящего из двух изотермических и двух адиабатных процессов.

В то же время известны и другие типы циклов, реализованные в работе тепловых машин, позволяющие достигать таких же, как и в цикле Карно, величин КПД. В докладе представлены результаты рассмотрения истории развития реальных тепловых машин, использующих отличные от цикла Карно процессы снятия энергии, такие как циклы Стирлинга, Эриксона и Брайтона.

Проведена некоторая систематизация информации о данных системах, сравнительный анализ, выявлены достоинства и недостатки, указаны некоторые области применения в современном мире и, возможные пути их дальнейшего совершенствования в наш век бурного развития энергетических установок и автомобильного транспорта.

В работе была представлена информация, об использовании моделирования конструкций различных типов тепловых машин. Так, системы, которые моделируют двигатели внешнего сгорания, включают в себя цикл Брайтона, системы, моделирующие газовые турбины, основаны на использовании цикла Стирлинга, а в основе систем, моделирующей двигатели горячего воздуха, лежит цикл Эрикссона.

Показаны некоторые схемы, отражающие особенности реализованных на практике устройств, принцип действия которых основан на использовании рассмотренных циклов.

Отмечено, что, так как мы повсеместно используем тепловые двигатели, которые обеспечивают большую часть мировой электроэнергии и приводят в действие подавляющее большинство транспорта, то путем совершенствования существующих конструкций тепловых

машин и разрабатывая новые вариации циклов, можно получить новые возможности для совершенствования энергетических установок и транспорта.

На основании проведенного анализа сделано следующее заключение. Мы повсеместно используем тепловые двигатели, которые обеспечивают большую часть мировой электроэнергии и приводят в действие подавляющее большинство транспорта.

В то же время, загрязнение планеты за счёт использования традиционных источников энергии таких как газ, нефть, уголь и ограниченность их запасов на планете в условиях постоянно растущего энергопотребления ставит вопрос о необходимости решения проблемы энергосбережения.

Одним из возможных вариантов решения этой задачи является разработка систем с повышенными значениями КПД.

Как показывает анализ рассмотренных систем, построенных на циклах Стирлинга, Эриксона и Брайтона, их развитие позволит сделать определённые шаги в решении данной глобальной задачи в широком спектре областей техники.

Подтверждением корректности этого заключения является то, что за рубежом уже проводятся работы по созданию новых, современных конструкций, использующих данные принципы и создаются устройства с повышенным КПД, применяемые в различных сферах жизнедеятельности.

Это указывает на необходимость проведения аналогичных работ в нашей стране, что позволит обеспечить в дальнейшем конкурентоспособность России на мировых рынках.

Использованные источники:

1. Васильев Г. П., Хрустачев Л. В., Розин А. Г., Абуев И. М. и др. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Правительство Москвы Москомархитектура, ГУП «НИАЦ», 2001. — 66 с.
2. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль. — Москва: Машиностроение, 1987.
3. Принцип работы двигателя Стирлинга [Электронный ресурс]: URL: https://magicmag.net/blog/princip-raboti-dvigatelya-sterlinga (дата обращения: 20.12.22).
4. Gas Turbine History [Электронный ресурс]: URL: https://web.archive.org/web/20100603225144/http://www.turbomachine.com/history/ (дата обращения: 20.12.22).
5. Massachusetts Institute of Technology [Электронный ресурс]: URL: http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node27.html (дата обращения: 20.12.22).
6. NASA’s Planetary Science Division Update [Архивная электронная копия]:URL:https://web.archive.org/web/20090621234802/http://nasascience.nasa.gov/researchers/sara/library-and-useful-links/Green_PSS_June%20508%20final. pdf (дата обращения: 20.12.22).
7. Oil&Gas Journal [Электронный журнал]: URL: https://www.ogj.com/general-interest/companies/article/17228343/worlds-largest-lng-compressors-designed-tested-for-qatargas-ii (дата обращения: 20.12.22).
8. PROJECTS–DETAIL. [Электронный ресурс]: URL: http://www.assystem.com/en/markets/projects-detail/36/indeho.html (дата обращения: 20.12.22).
9. The Ericsson Caloric Engine of 1851. [Электронный ресурс]: URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.cd5da766-63ac81f8-9d9817be-74722d776562/hotairengines.org/open-cycle-engine/ericsson-1851 (дата обращения: 20.12.22).
10. The Ericsson Caloric Engine of 1833. [Электронный ресурс]: URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.cd5da766-63ac81f8-9d9817be-

74722d776562/hotairengines.org/closed-cycle-engine/ericsson-1833 (дата обращения: 20.12.22).
11. UPME, Índices de Cobertura de Energía Eléctrica y GasNatural, Ministerio de Minas y Energía, República De Colombia, 2005.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОНЕЧНЫХ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ С ЧАСТНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ

Баутин С.П.[1], Карелина О.А.[1], Обухов А.Г.[2]
[1]*Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, г. Снежинск, Челябинская обл.*
[2]*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Тюменская обл.*

В данной работе предложенная методика представлений решений нелинейных уравнений в виде бесконечных тригонометрических рядов применена для описания решений системы из двух нелинейных уравнений с двумя независимыми пространственными переменными – уравнений движения сплошной среды. Доказана теорема о кратных частотах в рассматриваемом случае двух независимых пространственных переменных.

Ключевые слова: Тригонометрические ряды, нелинейные уравнения, сходимость тригонометрических рядов, теорема о кратных частотах, бесконечная система дифференциальных уравнений.

USING INFINITE TRIGONOMETRIC SERIES FOR SOLVING NONLINEAR EQUATIONS WITH PARTIAL DERIVATIVES

Bautin S.P.[1], Karelina O.A.[1], Obukhov A.G.[2]
[1]Snezhinsk Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region
[2]Tyumen Industrial University, Tyumen, Tyumen Region

In this paper, the proposed method for representing solutions of nonlinear equations in the form of infinite trigonometric series is applied to describe solutions to a system of two nonlinear equations with two independent spatial variables - the equations of motion of a continuous medium. A theorem on multiple frequencies is proved in the considered case of two independent space variables.

Key words: Trigonometric series, nonlinear equations, convergence of trigonometric series, multiple frequency result, infinite system of differential components.

Более двухсот лет назад Ж.Б.Ж. Фурье предложил решать линейное уравнение теплопроводности с помощью сходящегося тригонометрического ряда. В последующие годы этот метод решения линейных уравнений с частными производными стал очень востребованным. К сожалению эффективность тригонометрических рядов Фурье и более поздних обобщений этого подхода имеет место только при решении линейных задач. В этом случае бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений для искомых коэффициентов перед гармониками расщепляется и для каждого коэффициента получается одно свое уравнение. Оно обычно решается в явном виде, что позволяет построить все бесконечное разложение и доказать его сходимость.

Чуть более десяти лет назад, то есть после двухсотлетнего перерыва после работ Ж.Б.Ж. Фурье, методика применения бесконечных тригонометрических рядов была эффективно применена для математического моделирования одномерных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа при построении решений нелинейной системы уравнений с частными производными смешанного типа [1]. Однако доказать сходимость построенных тригонометрических рядов тогда не удавалось. Недавно удалось доказать сходимость

тригонометрических рядов, решающих одно нелинейное уравнение с частными производными – уравнение Бюргерса [2].

В данной работе предложенная методика представлений решений нелинейных уравнений в виде бесконечных тригонометрических рядов применена для описания решений системы из двух нелинейных уравнений с двумя независимыми пространственными переменными – уравнений движения сплошной среды. После подстановки используемых представлений в исходную систему уравнений движения и последующего проецирования двух получившихся уравнений на тригонометрический базис получается бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений для искомых коэффициентов рядов, зависящих от времени. Система записана в нормальной форме и в правые части каждого уравнения из этой бесконечной системы входит бесконечное число искомых функций.

Благодаря конкретным свойствам решений полученных бесконечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений доказана теорема о сходимости бесконечных тригонометрических рядов в некоторой окрестности точки $t=0$ и при всех значениях независимых переменных x, y.

Также доказана теорема о кратных частотах в рассматриваемом случае двух независимых пространственных переменных. Теорема о кратных частотах не имеет место в случае представления с помощью тригонометрических рядов решений линейных уравнений, поскольку в решении линейных уравнений при $t>0$ присутствуют только те гармоники, которые есть в начальных условиях при $t=0$. Новые гармоники в решениях линейных уравнений не возникают. В случае нелинейных систем уравнений с частными производными в решении при $t>0$ появляются гармоники с новые частотами, не совпадающими с частотами гармоник в начальных условиях. Доказанная теорема о кратных частотах установила по сравнению с одномерным случаем более сложную зависимость между частотами гармоник, присутствующих в начальных условиях, и частотами гармоник, входящих в решение при $t>0$. Из теоремы следует, что в данном случае частоты разделены как по независимым переменным, так и по направлениям распространения гармоник. Новая теорема о кратных частотах не отменяют, а только еще раз подтверждает наличие так называемого «немого аккорда», имеющего места в музыкальных произведениях.

Использованные источники:

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. – Новосибирск: Наука, 2014.
2. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Сходимость бесконечных тригонометрических рядов, решающих уравнение Бюргерса. – Снежинск: СФТИ, 2022.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Болдырев М.И.[1], Глазырин И.В.[1,2], Кириллов И.А.[3], Котова О.Г.[1], Михайлов Н.А.[1], Симоненко В.А.[1,2], Чижков М.Н.[1], Юсупов Ю.Ф.[1,2]
[1]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.,
[2]ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.,
[3]НИЦ Курчатовский Институт
i.v.glazyrin@vniitf.ru

В докладе представлены результаты моделирования горения водородно-воздушных смесей в диапазоне концентраций от обеднённой до стехиометрической. Моделирование выполнено трёхмерной газодинамической программой, учитывающей процессы вязкости, диффузии, теплопроводности, гетерогенную модель горения. Для описания турбулентного течения использовалась полуэмпирическая k-ε модель. Анализ результатов показал, что развитие пламени происходит поэтапно, от ламинарного горения к ускорению и последующей детонации.

Ключевые слова: Водородно-воздушная смесь, горение, ламинарно-турбулентный переход, детонация, численное моделирование, полуэмпирическая модель турбулентности.

NUMERICAL SIMULATION OF THE LAMINAR-TURBULENT TRANSITION DURING THE COMBUSTION OF HYDROGEN-AIR MIXTURES

Boldyrev M.I.[1], Glazyrin I.V.[1,2], Kirillov I.A.[3], Kotova O.G.[1], Mikhailov N.A.[1], Simonenko V.A.[1,2], Chizhkov M.N.[1], Yusupov Yu.F.[1,2]
[1]FGUP "RFNC-VNIITF im. academician E.I. Zababakhina, Snezhinsk, Chelyabinsk region,
[2]FGAOU VO "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region,
[3]NRC Kurchatov Institute
i.v.glazyrin@vniitf.ru

The report presents the results of modeling the combustion of hydrogen-air mixtures in the concentration range from depleted to stoichiometric. The simulation was performed by a three-dimensional gas-dynamic program that takes into account the processes of viscosity, diffusion, thermal conductivity, and a heterogeneous combustion model. The semi-empirical k-ε model was used to describe the turbulent flow. An analysis of the results showed that the development of the flame occurs in stages, from laminar combustion to acceleration and subsequent detonation.

Key words: Hydrogen-air mixture, combustion, laminar-turbulent transition, detonation, numerical simulation, semi-empirical turbulence model.

Детонации водородо-воздушной смеси посвящено значительное количество работ [1,2], однако ламинарно-турбулентный переход зависит от конкретных условий формирования смеси и геометрии области. Переход к детонации возможен если скорость продуктов реакции начинает превышать скорость звука в них.

Численное моделирование выполнено трёхмерной газодинамической программой [3], учитывающей процессы вязкости, диффузии, теплопроводности. Для учёта турбулентности используется k-ε модель турбулентности, адаптированная на случай многокомпонентного

сжимаемого течения. Система уравнений записана для усреднённых величин и уравнений для турбулентной кинетической энергии k и её диссипации ε

$$\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\,\bar{\bar{u}}_i)}{\partial x_i}=0,\quad \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{\bar{Y}}_k)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\,\bar{\bar{u}}_i\bar{\bar{Y}}_k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}\left(\overline{D_k}+D_t\right)\frac{\partial\bar{\bar{Y}}_k}{\partial x_i}\right)+\overline{\bar{\rho}\left(\frac{\partial Y_k}{\partial t}\right)_{хим}}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{\bar{u}}_j)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{\bar{u}}_i\bar{\bar{u}}_j)}{\partial x_i}=-\frac{\partial\,\bar{p}}{\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{2}{3}\bar{\rho}k\right)+\frac{\partial(\overline{\overline{\tau_{ij}}})}{\partial x_i}+\overline{\rho g_i},\quad \overline{\overline{\tau}}_{ij}=\left(\bar{\mu}+\mu_t\right)\left(\frac{\partial\overline{\overline{u}}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{\overline{u}}_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial\overline{\overline{u}}_k}{\partial x_k}\right) \tag{2}$$

$$\begin{gathered}\frac{\partial(\bar{\rho}\,E)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\,E\,\bar{\bar{u}})}{\partial x_i}+\frac{\partial(\bar{p}\,\bar{\bar{u}})}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{2}{3}\bar{\rho}\,k\,\bar{\bar{u}}\right)=\frac{\partial(\bar{p}\,a_i)}{\partial x_i}+\frac{\partial(\overline{\overline{\tau_{ij}}}\overline{\overline{u}}_j)}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\bar{\lambda}+\lambda_t\right)\frac{\partial\bar{T}}{\partial x_i}\right)+\\ +\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\bar{\mu}+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sum_l h_l J_i^l\right)+\overline{\sum_l h_l\bar{\rho}\left(\frac{\partial Y_l}{\partial t}\right)_{хим}}+\overline{\rho g_i}\,\bar{\bar{u}},\end{gathered} \tag{3}$$

Обозначения газодинамических величин в формулах (1)-(4) общепринятые, двойная верхняя черта обозначает усреднение величины по Фавру, одинарная черта – усреднение по Рейнольдсу [4]. Уравнения эволюции турбулентных величин

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\,k)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\,\bar{\bar{u}}_i k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\bar{\mu}+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)-\bar{\rho}\varepsilon+a_i\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\bar{\rho}\,k\frac{\partial\bar{\bar{u}}_i}{\partial x_i}+\overline{\overline{\tau}}_t:\frac{\partial\bar{\bar{u}}_j}{\partial x_i}, \tag{4}$$

где $\overline{\overline{\tau}}_t=\mu_t\left(\frac{\partial\overline{\overline{u}}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{\overline{u}}_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial\overline{\overline{u}}_k}{\partial x_k}\right)$, двоеточие в последнем слагаемом правой части обозначает двойное скалярное произведение тензоров;

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\,\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\,\bar{\bar{u}}_i\varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\bar{\mu}+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right)-C_2\bar{\rho}\frac{\varepsilon^2}{k}+C_0\,a_i\frac{\varepsilon}{k}\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i}-C_3\frac{2}{3}\bar{\rho}\,\varepsilon\frac{\partial\bar{\bar{u}}_i}{\partial x_i}+C_1\frac{\varepsilon}{k}\overline{\overline{\tau}}_t:\frac{\partial\bar{\bar{u}}_j}{\partial x_i}. \tag{5}$$

В уравнениях (4)-(5) в правых частях присутствует слагаемые с коэффициентом a_i, которые отвечают за генерацию турбулентности вследствие неустойчивости контактной границы – фронта пламени. Для описания данного эффекта выбрана BHR модель [5,6]

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\,a_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\,\bar{\bar{u}}_i\,a_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\bar{\mu}+\frac{\mu_t}{\sigma_a}\right)\frac{\partial a_i}{\partial x_j}\right)+b\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i}-\frac{R_{ij}}{\bar{\rho}}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x_j}+\bar{\rho}a_j\left(\frac{\partial a_i}{\partial x_j}-\frac{\partial\bar{\bar{u}}_i}{\partial x_j}\right)-C_{a1}\frac{\varepsilon}{k}a_i, \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\,b)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\,\bar{\bar{u}}_i\,b)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\bar{\mu}+\frac{\mu_t}{\sigma_b}\right)\frac{\partial b}{\partial x_i}\right)-2(b+1)a_i\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x_i}+-C_{b1}\frac{\varepsilon}{k}b, \tag{7}$$

где $b=\overline{\rho'\upsilon'}$, $\upsilon=\frac{1}{\rho}$, $R_{ij}=\frac{2}{3}\bar{\rho}\,k-\overline{\overline{\tau}}_t$, C_k, σ_l – константы модели.

Экспериментальная установка БМ-Т [7] представляет собой закрытую цилиндрическую трубу длиной 6 м и внутренним диаметром 0.325 м. Внутри на расстоянии 0.5 м друг от друга расположены кольца для создания препятствий распространяющемуся фронту пламени. Исследовалось горение смеси с объёмным содержанием водорода в воздухе от 9.5 до 11%. Моделирование показало, что на начальном этапе лёгкие продукты горения и водяной пар, по границе которого определяется скорость, всплывают наверх, по мере ускорения вытягиваются вдоль трубы – см. рисунок 1.

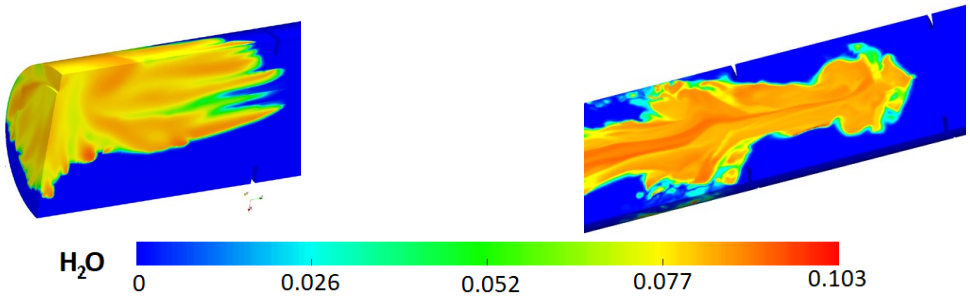


Рисунок 1 – Распределение концентрации H_2O вблизи точки инициирования (слева) и в центре трубы (справа). Объёмная доля водорода 11%

В условиях экспериментов в трубах с большим аспектным отношением длины к диаметру [7] после воспламенения пламя проходит стадии 1) «шарового», в котором пламя эволюционирует в ламинарном режиме с гладким неискаженным фронтом; 2) «ячеистой дефлаграции» – фронт пламени становится неустойчивым, увеличивается площадь поверхности горения, что приводит к увеличению скорости реакций и переходу к 3) «ускоренному пламени». Когда в головной части пламени число Рейнольдса *Re* превышает 2000 [8], происходит переход к турбулентному горению. С этого момента увеличение скорости реакций происходит за счёт взаимодействия пламени с турбулентностью и с ударными волнами, сжимающими и разогревающими свежую горючую смесь. В режиме турбулентного горения роль диссипативных процессов значительно уменьшается.

Наблюдается пульсирующий характер распространения пламени – см. рисунок 3, слева. Перед кольцом скорость падает, причем горением охвачен почти весь объём между кольцами – см. рисунок 1, справа. Затем струя пламени с большой скоростью движется до следующей области перед кольцом. Экспериментальные измерения дают близкие значения скорости фронта. Амплитуда рассчитанного перепада давления также близка к экспериментальной, но для совпадения по времени пришлось график давления сместить по времени на -170 мс. Объяснить это смещение предстоит в будущем.

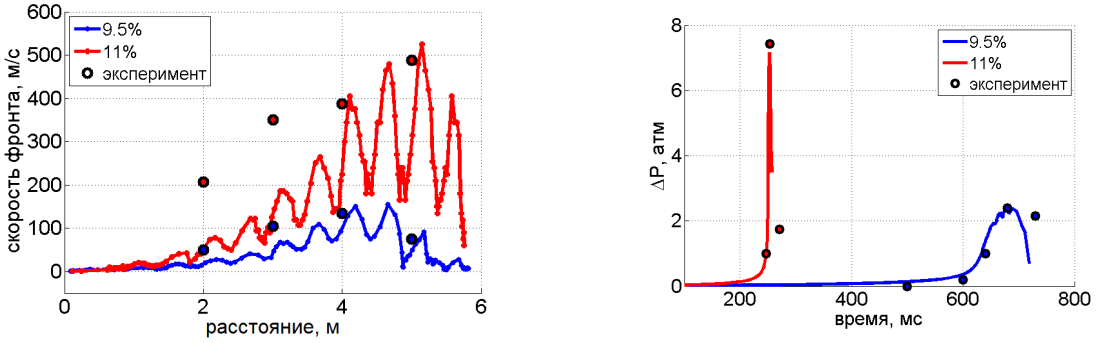


Рисунок 2 – Слева – скорость фронта пламени в зависимости от расстояния, справа – избыточное давление от времени

Моделирование показало, что наивысший уровень турбулизации в непрореагировавшей смеси наблюдается на стенках установки и вблизи препятствий. В смесях с долей водорода ≥ 10% максимальное значение энстрофии примерно одинаково и составляет 10^8 $с^{-1}$, в случае 9.5% уровень завихрённости на 2 порядка ниже. Число *Re* приближается к критическому значению в момент, когда фронт пламени преодолевает расстояние 4 метра.

Близость результатов расчётов и экспериментальных данных для установки БМ-Т показывает, что численная модель в программе работает адекватно. Переход к турбулентности происходит при превышении *Re* значения 2000, резко возрастают турбулентные вязкость, диффузия и доля турбулентной кинетической энергии в полной энергии вещества.

Использованные источники:

1. Veser A., Breitung W., Dorofeev S.B. Run-up distanced to supersonic flames in obstacle-laden tubes // J. Phys. IV France.–2002.– Vol.–12.–P. 333-340.
2. Böck L.R. Deflagration – to – Detonation Transition and Detonation Propagation in H2 – Air Mixtures with Transverse Concentration Gradients. Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, 2015.
3. Глазырин И.В., Михайлов Н.А. Конечно-объемная схема для многокомпонентных сжимаемых течений на неструктурированной сетке в трехмерной программе ФОКУС // ЖВМиМФ. – 2021. – 61, 6, – С.1019.
4. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon turbulence model, John Wiley & Sons, New York, 1994.
5. Besnard D., Harlow F.H., F.H. Rauenzahn F.H. and Zemach C. Turbulence Transport Equations for Variable-Density Turbulence and Their Relationship to Two-Field Models, LA-UR-12303, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1992
6. Schilling O., Comparative Study of the Predictions of Four Reynolds-Averaged Navier–Stokes Turbulence Models Applied to a Richtmyer-Meshkov Instability Experiment, 29th International Symposium on Shock Waves, Madison, WI, USA, 2013
7. Безгодов Е.В., Пасюков С.Д., Никифоров М.В., Тараканов А.А., Давлетчин Ю.Ф. Исследование ускорения пламён в бедных смесях водород-воздух для горизонтальной и вертикальной трубы // Научная сессия НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия, 2022.
8. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ВОЛЬФРАМА С ТРЕМЯ ПАРАМЕТРАМИ

Боярских К.А.[1,2,3], Хищенко К.В.[1,2,3,4]
[1]*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва*
[2]*ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», г. Долгопрудный, Московская обл.*
[3]*ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Московская обл.*
[4]*ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, челябинская обл.*
shagom55@gmail.com

Получено уравнение состояния жидкой фазы вольфрама с малым числом параметров. Предложен метод расчета теплоемкости. Произведены расчеты характеристик ударных волн в образцах вольфрама различной начальной плотности, результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными при высоких давлениях и температурах.

Ключевые слова: уравнение состояния, жидкая фаза, вольфрам, ударные волны, высокие давления, высокие температуры.

EQUATION OF STATE FOR THE LIQUID PHASE OF TUNGSTEN WITH THREE PARAMETERS

Boyarskikh K.A.[1,2,3], Khishchenko K.V.[1,2,3,4]
[1]*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region*
[3]*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow Region*
[4]*South Ural State University, Chelyabinsk*
shagom55@gmail.com

An equation of state for the liquid phase of tungsten with a small number of parameters is obtained. A method for calculating the heat capacity is proposed. The characteristics of shock waves in tungsten samples of various initial densities are calculated, and the calculation results are compared with experimental data at high pressures and temperatures.

Key words: equation of state, liquid phase, tungsten, shock waves, high pressures, high temperatures.

Работа посвящена описанию термодинамических свойств жидкой фазы вольфрама при высоких температурах и невысоких плотностях в рамках модели с тремя параметрами. Термическое уравнение состояния задается выражением

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^{\xi}},$$

где P –давление; T – температура; V – удельный объем; a, b и ξ – параметры. Отдельно в работе рассмотрены частные случаи $\xi = 2$ [1] и 4/3 [2].

Параметры уравнения состояния выбирались на основе данных по изобарическому расширению жидкой фазы вольфрама при высоких температурах. Для получения калорического уравнения состояния предложен метод расчета теплоемкости (в предположении ее постоянства) на основе данных ударно-волновых экспериментов с

исходно пористыми образцами. Также произведен расчет ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки, проведено сравнение результатов расчетов с соответствующими экспериментальными данными для образцов вольфрама с различной начальной плотностью. На основе условия согласия результатов расчетов и экспериментов определены границы применимости разработанного уравнения состояния.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, https://rscf.ru/project/19-19-00713/.

Использованные источники:

1. Van der Waals J.D. On the continuity of the gaseous and liquid states. – Leiden, 1873.
2. Ликальтер А.А. Критические точки конденсации в кулоновских системах // УФН. – 2000. – Т. 170, № 8. – С. 831–854.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА

Бугаенко А.А.[1,2], Крутова И.Ю.[2]
[1] *ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.,*
[2] *ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.*
bugaenkoanya@yandex.ru

В данном тезисе рассмотрено изучение природных восходящих закрученных потоков с помощью системы уравнений газовой динамики при учете действия сил тяжести и Кориолиса, приведен расчет линеаризованной на этом точном решении СУГД, анализируется поведение скорости звука и трех компонент вектора скорости газа на различных высотах и в разные моменты времени.

Ключевые слова: Восходящие закрученные потоки, системы уравнений газовой динамики, линеаризация системы уравнений газовой динамики, движение газа.

NUMERICAL SIMULATION OF ASCENDING SWIRLING FLOWS USING A LINEARIZED SYSTEM OF GAS DYNAMICS EQUATIONS WITH ACCORDING TO THE ACTION OF THE CORIOLIS FORCE

Bugaenko A.A.[1,2], Krutova I.Yu.[2]
[1]Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIITF im. academician E.I. Zababakhina, Snezhinsk, Chelyabinsk region,
[2]Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region.
bugaenkoanya@yandex.ru

This thesis considers the study of natural ascending swirling flows using a system of equations of gas dynamics, taking into account the action of gravity and Coriolis, the calculation of a linearized on this exact solution SUHD is given, the behavior of the speed of sound and the three components of the gas velocity vector at different heights and at different times is analyzed.

Key words: Ascending swirling flows, systems of gas dynamics equations, linearization of the system of gas dynamics equations, gas motion.

Природные восходящие закрученные потоки (ВЗП): торнадо, (тропические циклоны, огненные вихри представляют собой сложные и еще достаточно мало изученные явления с точки зрения их возникновения и продолжительного функционирования. Надежное теоретическое изучение этих потоков возможно только с использованием системы уравнений газовой динамики (СУГД) при учете действия сил тяжести и Кориолиса [1]. В силу нелинейности СУГД построение ее решений является достаточно трудоемким. Это и послужило причиной линеаризации СУГД на ее точных решениях [2].

В докладе приведена линеаризованная на этом точном решении СУГД при учете силы Кориолиса. Численное решение системы при соответствующих начальных и граничных условиях, проводилось в расчетной области в виде прямоугольного параллелепипеда, размеры которого соответствуют размерам среднего по интенсивности циклона [3]. Его нижняя грань совпадает с поверхностью Земли. Через квадратное отверстие в центре верхней грани расчетной области моделируется вертикальный плавный продув воздуха.

За начальные условия принимаются соотношения, описывающие покоящийся атмосферный воздух, которые являются точным аналитическим решением линеаризованной системы.

Граничные условия для искомых 4 функций выбираются в предположении, что газ из расчетной области может выходить только через ту часть верхней грани, где осуществляется продув, а входить только через боковые грани.

Все компоненты вектора скорости на четырех боковых гранях рассчитываются из условия непрерывности. Это означает, что воздух может пересекать все боковые граничные поверхности расчетной области.

В докладе анализируется поведение скорости звука и трех компонент вектора скорости газа на различных высотах и в разные моменты времени.

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.

Использованные источники:

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. Екатеринбург: УрГУПС, 2020. 400 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Линеаризованная система уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса. Снежинск: СФТИ, 2019. 60 с.
3. Баутин С.П. Скорость звука в многокомпонентной покоящейся среде // Прикладная механика и техническая физика. - 2008. - Т. 49, No3. - С. 35-44.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ КОНТЕЙНЕРА ВЗРЫВОМ НАХОДЯЩЕГОСЯ ВНУТРИ ЗАРЯДА КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Волосенко К.С.[1], Полеев В.Г.[2]
[1]*ФГБОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.*
[2]*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.*
volosenko.kirill@gmail.com

В докладе рассмотрены способы расчётного моделирования взрывного нагружения конструкций. Данный вопрос актуален при разработке устройств локализации взрыва, решении задачи исключения опасности группового взрыва при совместном транспортировании взрывных устройств и т.д.

Ключевые слова: взрывное нагружение, методы численного решения, функция давления от времени, метод взрыва с помощью частиц, Эйлерова постановка.

CONTAINER LOAD FORECASTING BY EXPLODING A CONDENSED EXPLOSIVE CHARGE INSIDE

Volosenko K.S. [1], Poleyev V.G.[2]
[1]*Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region*
[2]*FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I.Zababakhin", Snezhinsk, Chelyabinsk region*
volosenko.kirill@gmail.com

The report considers methods of calculation modelling of explosive loading of constructions. This issue is relevant in the development of explosion containment devices, solving the problem of eliminating the risk of a group explosion when transporting explosive devices together, etc.

Key words: *explosive loading, numerical methods, pressure function from time to time, particle blast method, Euler setting*

Основным способом решения подобных задач является численное моделирование. Для описания разрушаемой среды используется Лагранжев подход. В данной формулировке упрощается наложение граничных условий, так как граничные узлы всегда совпадают с границами материала. Разрушение конструкций, как правило, моделируется путём удаления элементов при выполнении в них определённых условий, например, критических деформаций.

Однако Лагранжевы переменные не всегда подходят для моделирования взрывного нагружения, т.к. они не предназначены для описания течения газообразных продуктов взрыва [1]. Для этого обычно используют другие приёмы. В докладе рассмотрено три подхода к решению данной задачи.

За основу взяты данные, полученные в серии экспериментов, в которой цилиндрический сосуд диаметром 170 мм и толщиной стенки 3 мм нагружался взрывом заряда тротила: в трёх вариантах: 174 г, 218 г и 435 г. Для регистрации использовался метод импульсной рентгенографии.

Первый подход состоит в задании взрывного воздействия на элементы конструкции в виде зависимости давления от времени, где давление описывается по эмпирическим зависимостям, полученным на основе обширной экспериментальной базы. В рассматриваемом

вычислительном комплексе рассматриваемое нагружение задается с помощью функции CONWEP [2]. Результаты решения задачи представлены на рисунке 1.

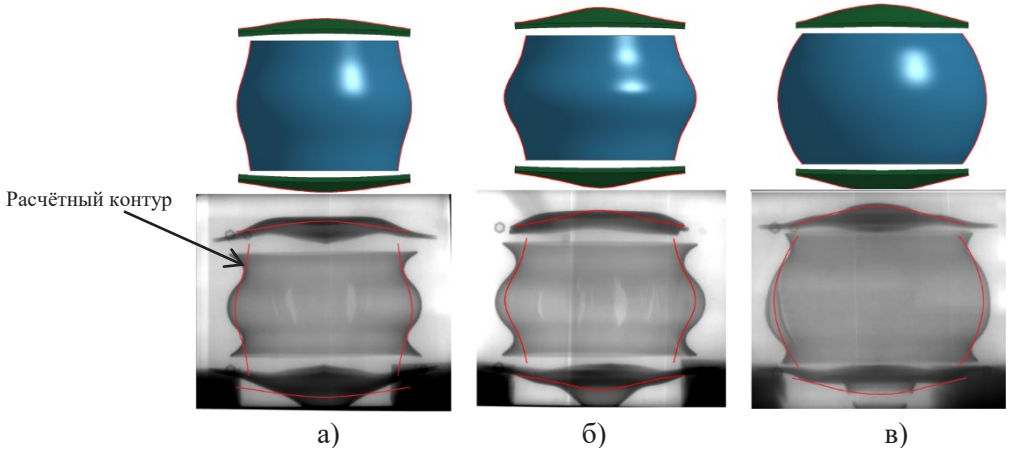


Рисунок 1. Результаты эксперимента и численного моделирования с помощью функции CONWEP: а) шашка КВВ m=174 г, б) шашка КВВ m=218 г, в) шашка КВВ m=435 г

Из расчета видно, что форма цилиндрической трубы не совпадает с результатами эксперимента. Это объясняется тем, что метод задания нагрузки учитывает только давление воздушной ударной волны, без продуктов детонации, что является недостаточным для точного описания.

Следующий метод задания взрывного нагружения – метод частиц (particle blast method, PBM), основанный на молекулярно-кинетической теории газа [3,4]. Данный метод учитывает не только воздушную ударную волну, но и поведение газообразных продуктов детонации, обладающих высокой скоростью и температурой. Метод PBM подходит для решения задач со сложной геометрией и сложными границами. Полученные данным методом результаты представлены на рисунке 2. Контур исследуемой формы лучше согласуется с результатами эксперимента.

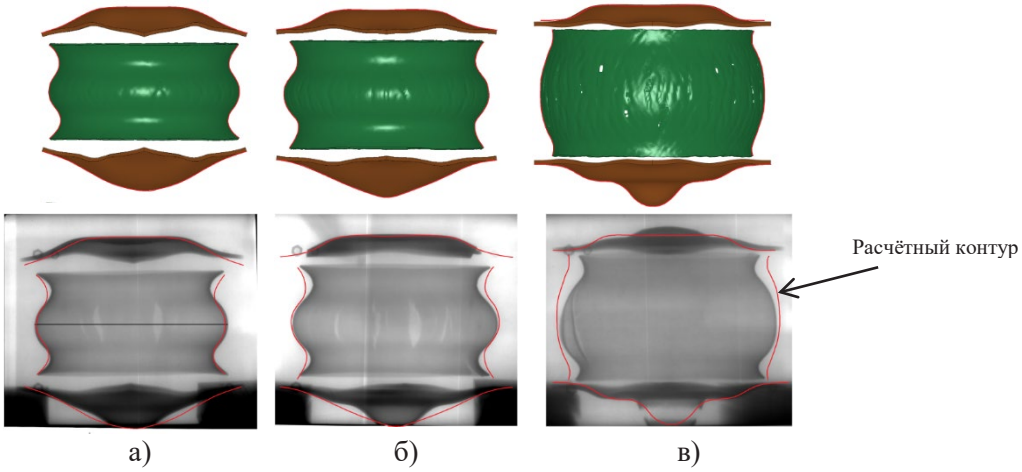
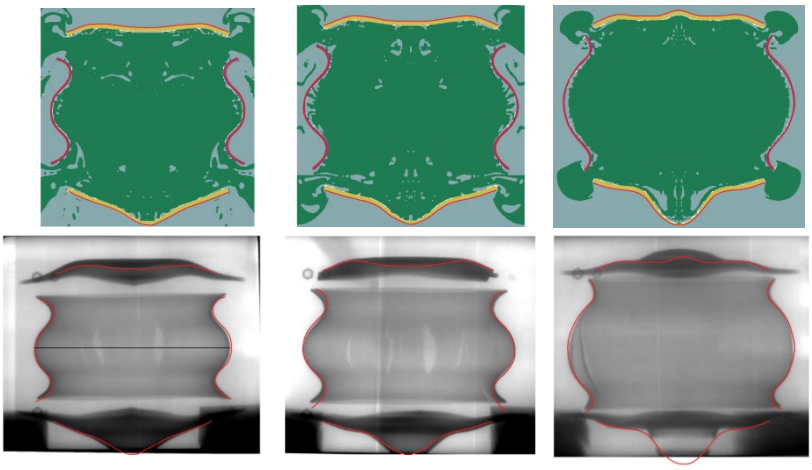


Рисунок 2. Результаты эксперимента и численного моделирования с помощью метода взрыва частиц: а) шашка КВВ m=174 г, б) шашка КВВ m=218 г, в) шашка КВВ m=435 г

Для более точного описания взрывного нагружения служит Эйлерова постановка, в которой положение узлов сетки фиксировано, а материал течет через сетку [5]. Так как объект обладает осевой симметрией, в связи с высокой ресурсоёмкостью использовалась осесимметричная двумерная постановка расчётов. По данным расчета на основе рассматриваемой методики наблюдается наилучшее совпадение форм (рисунок 3).



а) б) в)

Рисунок 3. Результаты эксперимента и численного моделирования с помощью Эйлеровой постановки: а) шашка КВВ m=174 г, б) шашка КВВ m=218 г, в) шашка КВВ m=435 г

Таким образом, получено, что метод задания взрывного нагружения с помощью эмпирической функции CONWEP позволяет определить давление, действующее на элемент, зная массу заряда и расстояние до него. Но данный метод применим только для несложной геометрии, так как он не учитывает действие продуктов взрыва на конструкцию, отражение ударной волной от поверхности, а также огибание ударной волной препятствий. Моделирование высокоскоростного процесса в Эйлеровой постановке является ресурсозатратным. Данный метод показал наилучшее совпадение форм, но для решения сложных задач требуется больше вычислительных ресурсов. Решение задачи с помощью метода частиц дало удовлетворительный результат, по сравнению с функцией CONWEP, при этом и он является менее ресурсоёмким, чем Эйлеровая постановка.

Использованные источники:

1. Никонов В.В. Применение подходы Лагранжа к решению одномерной задачи распространения ударных волн в газе/ В.В. Никонов, В.Г. Шахов. – 2011. – т.13. – №6. – С. 134-141
2. Смирнов А.А. Моделирование взрывного воздействия на конструкцию в LS-DYNA
3. Хайлен Тэн. Исследование масштабируемости метода частиц при динамической балансировке нагрузки// Материалы XV международной конференции пользователей LS-DYNA, 2018 г., с.1-8.
4. Хайлонг Тэн, Метод взрыва частиц (PBM) для моделирования взрывной нагрузки / Хайлонг Тэн, Джейсон Ван // 13 Международная конференция пользователей LS-Dyna, С. 1-7
5. Абузяров К.М. численная методика определения взрывных нагрузок в Эйлеровых переменных на пространственные конструкции при детонации твердых взрывчатых веществ/ К.М. Абузяров, М.Х. Абузяров, С.В. Зефиров// Проблемы прочности и пластичности. – 2014. – т.76. - №4. – С. 326-334.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДАННЫХ ПРИ ПЕРЕКРЕСТНОМ ИЗМЕНЕНИИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЯ

Гнеушев Н.В.[1], Горбатов А.Д.[2], Казаков И.А.[3], Каримов В.А.[4], Шишкин Н.Я.[5], Ибрагимов Я.О.[6]
[1]*2 курс, группа ПТМ-21д,* [2]*4 курс, группа ПТМ-49д,* [3]*5 курс, группа ПТМ-58д,*
[4]*5 курс, группа БВ-58д,* [5]*6 курс, группа БВ-67д,*
СФТИ НИЯУ МИФИ, г. Снежинск, Челябинская обл.
[6]*Руководитель направления искусственного интеллекта АО "Гринатом", г. Москва, Московская обл.*
yoibragimov@greenatom.ru

В докладе рассмотрен современный вид обработки данных с помощью нейросетевых алгоритмов. Данный вопрос актуален с целью дальнейшего развития ИИ в области аддитивных технологий и применения дальнейших исследований и обучения.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, испытания, нейросеть

PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA WITH THE HELP OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS, PREDICTION OF DATA WHEN CROSS CHANGING THE INPUT PARAMETERS OF THE PRODUCT

Gneushev N.V.[1], Gorbatov A.D.[2], Kazakov I.A.[3], Karimov V.A.[4], Shishkin N.Ya.[5], Ibragimov Ya.O.[6]
[1]PTM-21D group, [2]PTM-49D group, [3]PTM-58D group, [4]BV-58D group, [5]BV-67D group, SPTI NRNU MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region
[6]Head of the artificial intelligence direction of JSC "Green Atom", Moscow, Moscow region.
yoibragimov@greenatom.ru

The report considers a modern type of data processing using neural network algorithms. This issue is relevant for the further development of AI in the field of additive technologies and the application of further research and training.

Keywords: Additive technologies, testing, neural network

Аддитивные технологии всё больше входят не только в нашу повседневную жизнь, но и в различные отрасли производства. При этом любой аддитивный процесс имеет слишком много параметров, влияющих на финальные физические свойства, получаемого объекта. В связи с чем возникла гипотеза о влиянии параметров аддитивного процесса на свойства изделия.

Но аддитивная технология имеет много разновидностей:

- SLM (Selective Laser Melting) ;
- FDM (Fused Deposition Modeling);
- SLA (Laser Stereolithography);
- LCD (Liquid Crystal Display);
- PJP (PolyJet Printing);
- SLS (Selective Laser Sintering).

Для проведения исследований нами была выбрана технология FDM. Данный выбор обусловлен двумя факторами: большой распространённостью и внедрению в реальные

производственные процессы, большим количеством параметров, что обеспечит широкую выборку для исследований.

Поскольку написания нейросетевых алгоритмов и их обучение длительный процесс, было принято решение о том, что выделить тестовый параметр, в результате которого мы будем понимать физические характеристики полученного изделия. Таким образом выделили параметр – Высота слоя 3D-печати. После этого были выращены образцы на испытания на разрыв, с шагом высоты 0,05 мм. Затем образцы были испытаны в лаборатории «Сопротивление материалов» СФТИ НИЯУ МИФИ. Нами были получены графики, и мы приступили к созданию нейросетевых алгоритмов, и в процессе работы нами было принято о решение ориентироваться на график и показания датчика.

Работа нашего алгоритма проходит по этапам: берется видео испытаний и выделяется аудио, далее выделяются «щелчки», и программа находит значения которые им соответствуют. Далее предполагается изменённые различных параметров печати и обучения нейросетевого алгоритма с целью предсказания свойств детали.

Использованные источники:

1. Редько, В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики / В.Г. Редько. - Москва: ИЛ, 2017. - 224 с.
2. Рышард, Тадеусевич Элементарное введение в технологию нейронных сетей с примерами программ / Тадеусевич Рышард. - М.: Горячая линия - Телеком, 2018. - 896 с.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: наука, 1986.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДБОР РЕЖИМОВ РЕЗКИ ЛАЗЕРОМ ПОЛИЛАКТИДА

Гнеушев Н.В.[1], Горбатов А.Д.[2], Казаков И.А.[3], Каримов В.А.[4], Шишкин Н.Я.[5], Горбатов И.В. [6], Орлов Ю.А.[7]
[1]*2 курс, группа ПТМ-21д,* [2]*4 курс, группа ПТМ-49д,* [3]*5 курс, группа ПТМ-58д,*
[4]*5 курс, группа БВ-58д,* [5]*6 курс, группа БВ-67д,*
СФТИ НИЯУ МИФИ, г. Снежинск, Челябинская обл.
[6,7] *старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» СФТИ НИЯУ МИФИ, г. Снежинск, Челябинская обл.*
IVGorbatov@mephi.ru

В докладе рассмотрены вопросы резки полилактида современными лазерными резаками.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, режимы резки, лазер.

EXPERIMENTAL SELECTION OF LASER CUTTING MODES OF POLYLACTIDE

Gneushev N.V.[1], Gorbatov A.D.[2], Kazakov I.A.[3], Karimov V.A.[4], Shishkin N.Ya.[5], Gorbatov I.V. [6], Orlov Yu.A.[7]
[1]PTM-21D group, [2]PTM-49D group, [3]PTM-58D group, [4]BV-58D group, [5]BV-67D group, SPTI NRNU MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region
[6,7]Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, SPTI NRNU MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region.
IVGorbatov@mephi.ru

The report deals with the issues of cutting polylactide with modern laser cutters.

Keywords: Additive technologies, cutting modes, laser.

История изобретения лазера берёт свое начало ещё с начала 20 века. Ещё в 1916 году Альберт Эйнштейн предсказывает процесс вынужденного излучения, а уже в 1954 появляется первый предшественник современных лазеров – Мазер. А первый лазер в классическом понимании был показан в 1960 году. С этого момента человечество активно пытается внедрить Лазер не только в различные научные исследования, но и в производство. Наибольшую распространённость в производстве получили углекислотные лазеры в связи с универсальностью и дешевизной, однако даже в наше время список материалов, применимых для резки очень небольшой. Поэтому нами была выдвинута гипотеза о том, что полилактид может прекрасно подойти для резки на таком оборудовании.

Для начала разберемся что же такое полилактид? Полилактид - биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы, а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов. Большинству данный материал известен под названием PLA-пластик. Он активно применяется как материал FDM- печати.

Далее мы создали тестовые варианты режущих поверхностей, при этом не забыв выделить некоторый цветовой диапазон наших пластин, с целью проследить влияние цветового диапазона на процесс резки материала. Процесс резки зависит от двух факторов мощности излучения и скорости движения лазера по материалу. Изначально нами была

сделана огромная выборка по мощности резки, в результате которого мы подобрали оптимальный режим мощности.

В результате проведенных исследований мы выявили соотношения режимов резки полилактиада, зависимость от цвета материала, а также подобрали наиболее оптимальные режимы для резки.

Использованные источники:

1. Арутунян, Р.В. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р.В. Арутунян, В.Ю. Баранов, Л.А. Большов, и др.. - М.: Наука, 1989. - 367 с.
2. Виноградов, Б. А. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. Научные основы и прикладные задачи. В 2 книгах. Книга 1. Полимерные материалы. Научные основы лазерного воздействия на полимерные диэлектрики / Б.А. Виноградов, К.Е. Перепелкин, Г.П. Мещерякова. - М.: Наука. Ленинградское Отделение, 2006. - 384 с.
3. Виноградов, Б. А. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. Научные основы и прикладные задачи. В 2 книгах. Книга 2. Полимерные материалы. Практическое применение лазерных методов в изучении и обработке / Б.А. Виноградов, К.Е. Перепелкин, Г.П. Мещерякова. - М.: Наука. Ленинградское Отделение, 2007. - 448 с.

АРГУМЕНТЫ ДЛЯ РАЗНЫХ КАТЕГОРИЙ НАСЕЛЕНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДДЕРЖКИ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Горин Н.В.[1], Кузнецов Е.В.[1], Водолага Б.К.[1], Волошин Н.П.[1], Кучинов В.П.[2], Декусар В.М.[3], Моисеев А.В.[4], Васильев А.П.[4], Шидловский В.В.[5]
[1] *ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.,*
[2] *НИЯУ МИФИ, г. Москва*,
[3] *АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск, Калужская обл.,*
[4] *АО «НИКИЭТ», г. Москва*,
[5] *АО «Прорыв», г. Москва*.
n.gorin@vniitf.ru

Предложены основные аргументы для разных групп населения, предназначенные для изменения отношения общества к атомной энергетике и обеспечения поддержки ее развития. Отмечена необходимость разной по содержанию и объёму информации для разных категорий населения и особенно для педагогов и школьников, как будущих граждан России.

Ключевые слова: категории населения, парадигма развития, загрязнение окружающей среды, атомная энергетика.

ARGUMENTS FOR DIFFERENT CATEGORIES OF THE POPULATION IN THE INTERESTS OF SUPPORT FORMATION OF THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR ENERGY

Gorin N.V.[1], Kuznetsov E.V.[1], Vodolaga B.K.[1], Voloshin N.P.[1], Kuchinov V.P.[2], Dekusar V.M.[3], Moiseev A.V.[4], Vasilyev A.P.[4], Shidlovsky V.V.[5]
[1)]FSUE RFNC - VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin, Snezhinsk.
[2] NRNU MEPhI, Moscow.
[3] A.I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk.
[4] JSC “NIKIET”, Moscow.
[5] JSC “Proryv”, Moscow.
n.gorin@vniitf.ru

The main arguments have been proposed for different groups of the population intended for changing the attitude of society to nuclear energy and providing support for its development. The necessity of different information for different categories of the population is noted, in particular for teachers and schoolchildren as future citizens of Russia.

Key words: population categories, development paradigm, environmental pollution, nuclear energy.

Стратегия развития атомной энергетики «Стратегия-2018» в среднесрочной перспективе (15-30 лет) предполагает переход к двухкомпонентной ядерно-энергетической системе с тепловыми (РТН) и быстрыми (РБН) реакторами в едином замкнутом ядерном топливном цикле (ЯТЦ). РТН будут вырабатывать свой ресурс еще в XXII веке.

Для широкомасштабного развития атомной энергетики требуется выполнение ряда условий. Прежде всего, необходимость развития должна быть обоснована и подготовлена научная и технологическая база [1, 8, 10]. Должны быть решены проблемы безопасности, экономичности, обращения с радиоактивными отходами и нераспространением ядерного оружия [4]. Другим важным условием является поддержка населением развития атомной

энергетики в целом. Формирование поддержки требует аргументированной информации об атомной энергетике как инструменте решения выше отмеченных проблем.

Как известно, население любой страны неоднородно и формирование общественного мнения зависит, прежде всего, от малой, но исключительно важной группы лиц, принимающих решения – государственных лидеров разного уровня, руководителей органов власти, ведущих отраслей промышленности, бизнеса и СМИ. Вместе с тем, эта группа также ориентируется на общественное мнение, заметным влиянием на формирование которого обладают «авторитетные категории» – люди, с которыми население взаимодействует в форматах или «один на один», или «один со многими» и к мнению которых прислушивается. Это, прежде всего, журналисты, блогеры, а также медики, руководители органов местного самоуправления и пр. Особое место в этой категории населения занимают педагоги, работающие со школьниками и студентами.

Интуитивно ясно, что количество аргументов в пользу развития атомной энергетики для населения не должно быть очень большим, скорее всего, достаточно будет нескольких, кратких и доходчивых, из которых человек запомнит не более одного или двух, но которые должны свидетельствовать в поддержку развития широкомасштабной атомной энергетики.

Известно, что не только население в России, но и во всём мире настороженно относится к развитию атомной энергетики, и это отношение варьируется от активного неприятия до пассивно-нейтрального [9]. До последнего времени оно ярко проявлялось в Евросоюзе. Однако из-за неспособности солнечной и ветровой энергетики решить проблемы обеспечения энергией Европы и с целью минимизации экологических вызовов современности Еврокомиссия приняла дополнение к Европейской Таксономии и признала атомную энергетику наравне с газовой «зелёными» источниками энергии, хотя и не без оговорок [11]. Действительно, газовая энергетика может быть признана «зеленой» только при улавливании углерода, поступающего в атмосферу при сжигании газа.

Это пока только первый, но важный этап, изменения отношения произошёл на директивном уровне и, несомненно, скажется и на отношении населения к атомной энергетике. Изменение мнения руководства ЕС произошло, в том числе, благодаря усилиям специалистов атомной отрасли, подготовивших аргументированный доклад [13]. В этой связи следует продолжать усилия по формированию востребованного отношения всех категорий населения к атомной энергетике в поддержку ее развития.

Ниже предлагаются основные аргументы, которые помогут убедить разные категории населения поддержать развитие широкомасштабной атомной энергетики на новой технологической платформе.

1. Без экологически чистой энергетики у современной цивилизации нет будущего. Один из основных вызовов современности – загрязнение окружающей среды, выбросы парниковых газов и, возможно, связанное с этим глобальное потепление. Парадигма развития человечества, многие тысячелетия рассматривавшая природу как неограниченный источник сырья и места утилизации отходов человеческой деятельности, начала приходить в противоречие с ограниченными её возможностями. Еще 15 лет назад отмечалось, что к началу XXI века уровень совокупного воздействия человека на биосферу на порядок превысил допустимый предел [7]. Основные загрязнители известны — объекты углеводородной энергетики, промышленность и транспорт. Поэтому назрела замена углеводородных источников энергии на альтернативные, включая атомную [3].

При проведении разъяснительной работы можно рекомендовать слушателям обдумать информацию, представленную на рис.1, который в виде твердой копии или файла может быть раздаточным материалом. Как видно из рисунка, решение экологической проблемы связано с назревшей необходимостью корректировки парадигмы развития человечества на основе новой технологии получения энергии, при которой на единицу массы сырья будет производиться на несколько порядков больше энергии и меньше отходов. Это атомная энергетика и других вариантов в настоящее время нет. При переходе на двухкомпонентную

энергетику, а затем на РБН с замкнутым ЯТЦ разница в потреблении сырья и образовании отходов станет еще более впечатляющей.

Предложенный аргумент подходит для всех категорий населения.

Рис.1. Одна из причин экологического кризиса и способ его разрешения.

2. Исчерпание запасов ископаемого углеводородного сырья. В настоящее время достаточно точно известны запасы угля, нефти и газа, известна интенсивность его использования и, следовательно, просто вычисляется срок исчерпания каждого ресурса, поскольку обнаружение новых крупных месторождений углеводородного сырья маловероятно. Совершенствование технологий сможет незначительно отодвинуть срок исчерпания, однако не изменяет общую картину и табл.1 демонстрирует, что в течение нескольких ближайших поколений запасы нефти и газа, в основном, будут исчерпаны [1]. Однако, в интернете периодически публикуются мнения руководителей Газпрома, что ряд месторождений будет эксплуатироваться до ~2140 г.

	Мир			Россия		
Энергоноситель	Запасы	Потребление в год	Срок исчерпания, лет	Запасы	Потребление в год	Срок исчерпания, лет
Нефть, млрд т	232	4,85	~50	13	0,5	25-30
Газ, трлн $м^3$	187	3,7	~50	40–50	0,6–0,7	60–70
Уголь, млрд т	~1 000	8	~120	150–170	0,35	~450
РТН с открытым ЯТЦ, тыс. ГВт(э)·год*)	~60	0,45	130	~6	0,045	130
РБН с замкнутым ЯТЦ, тыс. ГВт(э)·год*)	~10 000	~10	>1 000	1 000	~1	>1 000

*) Для 10 млн т U. Запасы урана в мире оценены в количестве 8 млн т со стоимостью извлечения <130 $/кг (в России 0,635 млн т) и 10 млн т со стоимостью извлечения <260 $/кг.

Табл.1. «Шагреневая кожа» современных энергоисточников.

Погрешности сроков исчерпания ресурсов можно оценить в ~30…50 лет и они соизмеримы со временем жизни 1…2 поколений людей.

Вместе с тем, существующая сегодня атомная энергетика на реакторах на тепловых нейтронах с открытым ЯТЦ также не является решением ресурсной проблемы, поскольку срок исчерпания запасов урана в этом случае незначительно превышает сроки исчерпания запасов нефти и газа, или даже совпадает с ними с учетом погрешностей оценок. Единственная энерготехнология, обеспеченная сырьем на многие столетия – атомная энергетика на основе РБН с замкнутым ЯТЦ не оставляет выбора для будущих поколений, если за это время не удастся освоить термоядерную энергетику.

Приведенный аргумент подходит для всех категорий населения.

3. Аргументы для лиц, принимающих решения. Как правило, эти лица обладают достаточным кругозором, владеют информацией по проблемам «в целом», мелкие особенности им не важны, их интересуют только достаточно общие вопросы. Так, например, в области международной политики – о возможности обнаружить попытки тайного создания ядерного оружия соседним государством, а в области экономики – о целесообразности масштабных инвестиций в атомную энергетику в ближе-, средне- и долгосрочной перспективах.

Тайные попытки создания ядерного оружия, используя технологии РБН с инфраструктурой замкнутого ЯТЦ, скорее всего, могут быть обнаружены при анализе МАГАТЭ всей относящейся к применению гарантий информации. Работы по совершенствованию этой системы проводятся в настоящее время [5]. Переключению ядерного материала в производствах замкнутого ЯТЦ препятствует система технических барьеров, которая совместно с гарантиями МАГАТЭ делает такое событие маловероятным [6].

Целесообразность инвестиций, во-первых, следует из данных табл.1, показывающих истощение не только запасов нефти и газа в среднесрочной перспективе, но и запасов дешевого урана-235, основного ядерного материала атомной энергетики с тепловыми реакторами, а, во-вторых, из улучшающейся экономической конкурентоспособности атомной энергетики.

В технологиях РБН с замкнутым ЯТЦ Россия занимает лидирующие позиции и их следует сохранять для обеспечения экспортных перспектив российских технологий [12].

4. Аргументы для педагогов. Если для населения можно ограничиться несколькими аргументами, то для авторитетных категорий, прежде всего, для педагогов этого слишком мало. Для воспитания будущих граждан России педагог должен знать намного больше о радиационных технологиях, атомной энергетике, ее достоинствах и недостатках.

Школьники перенимают жизненную позицию своих учителей и, как правило, она оказывает на них заметное влияние. Каждый год во взрослую жизнь в России вступает около 2 млн молодых людей, завершивших школьное образование, со сложившейся системой ценностей, сформированной под влиянием многих факторов и авторитетов: своих родителей, педагогов, и других, не всегда самых лучших источников информации. Поэтому для педагогов подготовлены и систематизированы первоисточники с достоверной информацией [2]. При этом основной упор следует направить на возможность устойчивого развития человеческой цивилизации в условиях нарастающего загрязнения окружающей среды, которое в таких условиях не только не очевидно, но даже сомнительно. Потребление энергии, со снижением которого вряд ли согласятся страны «золотого миллиарда», характеризует общий уровень потребления всех материальных благ, природных ресурсов и, соответственно, масштаб отходов и загрязнения окружающей среды. Выходом из создавшегося положения является широкомасштабное развитие атомной энергетики на новой технологической платформе.

Заключение. Обеспечение устойчивого развития человеческой цивилизации связано с атомной энергетикой и других вариантов пока нет. Однако, требуется поддержка населения на основе аргументированной информации об атомной энергетике как инструменте решения энергетических и экологических проблем при достижении приемлемого для населения уровня безопасности, экономичности, обращения с радиоактивными отходами и риска

распространения ядерного оружия. Основными аргументами для формирования такой поддержки могут служить:

- Необходимость экстренного реагирования на чрезмерное загрязнение окружающей среды за счёт существенного снижения доли углеводородных энергоисточников;
- В настоящее время нет других вариантов такого снижения без потери уровня энергопотребления кроме перехода на новую технологию получения энергии, которая на единицу массы сырья производит на несколько порядков больше энергии и меньше отходов;
- Исчерпание запасов углеводородного сырья за время жизни ближайших 2-3 поколений, которое может быть компенсировано использованием атомной энергетики на основе РБН с замкнутым ЯТЦ.

Использованные источники

1. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. Под общей редакцией проф. Е.О. Адамова. Москва. Издательство АО «НИКИЭТ» 2020.
2. Головихина О.С., Брехова Н.В., Горин Н.В., Шмаков Д.В. Систематизация информации для работы с населением в интересах атомной энергетики // Вестник ЧГПУ, 2018, №1, с. 58-66. DOI: 10.25588/CSPU.2018.01.06
3. Горин Н.В., Водолага Б.К., Кучинов В.П., Шидловский В.В. Атомная энергетика как основа устойчивого развития // Государственное управление. Электронный вестник. 2022. № 95. С. 7-19. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-7-19
4. Горин Н.В., Волошин Н.П., Чуриков Ю.И. и др. Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом // Атомная энергия. 2021, Т.130, вып. 1, С. 48-51.
5. Горин Н.В., Карманов А.Л., Первиненко В.Н. и др. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортёром быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ // Атомная энергия, 2021, Т.131, вып. 4, С. 227-232.
6. Горин Н.В., Кузнецов Е.В., Кучинов В.П., Чебесков А.Н. и др. Барьеры на путях ядерного распространения при экспорте российских быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (на примере БРЕСТ ОД-300) // Вестник НЯЦ, 2021, вып. 4(88), С. 16-21. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21
7. Данилов-Данильян В.И. Устойчивое развитие и нескончаемые дискуссии о нем // Экологический ежегодник. 2008. №2. с.6-13.
8. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле, под ред. Н.Н. Пономарева-Степного Н.Н. — М.: Техносфера, 2016. — 139 с. http://elib.biblioatom.ru/text/dvuhkomponentnaya-yadernaya-systema_2016/
9. Мельникова Н.В., Артемов Е.Т., Бедель А.Э., Волошин Н.П., Михеев М.В. История взаимодействия ядерной энергии и общества в России // Екатеринбург. 2018. Издательство Уральского университета. DOI 10.15826/B978-7996-2492-7.
10. Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. и др. Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа) // Атомная энергия, 1992, т. 72, вып. 4, с. 317—329.
11. Признание в Европе // Атомный эксперт. №1(95). 2022. С. 7-9.
12. Gorin NV, Kuchinov VP, Krivtsov AV, Orlov AI, Shidlovskiy VV, Matveeva DB (2022) Export prospects of fast reactors desined in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities. Nuclear Energy and Technology 8(3): 153–159. https://doi.org/10.3897/nucet.8.80757
13. Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 («Taxonomy Regulation»), JRC report, 2021.

К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ В ДИСТАНЦИОННОМ ФОРМАТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Дьячков М.Р.
ФГАОУ ВО «Новоуральский технологический институт НИЯУ МИФИ», г. Новоуральск, Свердловская обл.
dyachkov.mixa@mail.ru

Данная статья посвящена изучению особенностей применения программного обеспечения при дистанционном обучении. Рассмотрены различные платформы для онлайн-обучения, определенны их достоинства и недостатки. Также рассмотрены программные продукты для проведения лабораторных работ при обучении студентов технических направлений.

Ключевые слова: программное обеспечение, дистанционная форма обучения, образовательный процесс, лабораторные работы, высшие учебные заведения.

ON THE ISSUE OF ORGANIZING LABORATORY WORK IN TECHNICAL DISCIPLINES IN A REMOTE FORMAT USING SOFTWARE

Dyachkov Michail Romanovich
Novouralsk Technological Institute of the National Research Nuclear University "MEPhI", Novouralsk, Sverdlovsk Region
dyachkov.mixa@mail.ru

This article is devoted to the study of the features of software application in distance learning. Various platforms for online learning are considered, their advantages and disadvantages are determined. Software products for laboratory work in the training of students of technical areas are also considered.

Keywords: software, distance learning, educational process, laboratory work, higher educational institutions.

Инновации характерны для любой профессиональной деятельности человека, в том числе и для сферы образования. Сами по себе инновации не возникают, они являются результатом научных поисков, опытом отдельных преподавателей и целых коллективов [1].

Одним из видов инноваций в организации профессионального образования является внедрение дистанционного обучения.

Дистанционное обучение представляет собой образовательный процесс с применением технологий, обеспечивающих связь обучающихся и преподавателей на расстоянии, без непосредственного контакта [2].

Процессы цифровой трансформации сферы высшего образования, инициированные правительством РФ[1] в рамках стратегического развития страны, привели к активному внедрению в вузах инновационных технологий в том числе дистанционных. Указанным процессам цифровизации образовательной сферы также способствовала ситуация, вызванная новой коронавирусной инфекцией. Во время пандемии вузы столкнулись с рядом проблем по организации образовательного процесса в дистанционном формате, в том числе, с проблемой выбора подходящей платформы для дистанционного обучения. Среди таких платформ наиболее известными в настоящее время являются [3]: Moodle, WebTutor, Teachbase, iSpring Learn, GeCourse и другие. Данные платформы имеют ряд преимуществ: свободный доступ к

[1] Распоряжение Правительства РФ от 21 декабря 2021 г. № 3759-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации науки и высшего образования»

информации, хранение большого количества обучающих материалов, наличие возможностей обмена опытом между преподавателями и студентами, сбор статистики, отслеживание прогресса обучения и др.

При наличии перечисленных достоинств, у дистанционного обучения есть и недостатки, среди которых необходимо отметить затруднения в установлении обратной связи, оценке степени понимания материала обучающихся и реакций обучаемых. Не смотря на наличие недостатков, указанные выше платформы широко применяются для проведения лекционных и практических занятий. Именно благодаря тому, что на момент объявления пандемии коронавируса, во многих вузах уже имелись платформы для дистанционного обучения, вынужденный перевод образовательного процесса в онлайн-формат в период пандемии, произошел достаточно безболезненно.

Иначе обстоит дело с проведением лабораторных работ в дистанционной форме обучения. Согласно исследованию Университета 2035 [3], большинство вузов не смогли полноценно перенести в онлайн данные работы. Проблема перевода лабораторных работ в онлайн-формат затронула, прежде всего, технические направления подготовки.

Лабораторные работы в очном формате, как правило, проводятся на специализированных лабораторных стендах в учебных лабораториях. При этом процесс проведения лабораторной работы включает три этапа: подготовительный, на котором ставятся цели работы, происходит знакомство с оборудованием; измерительный, когда студенты выполняют непосредственно регистрацию опытных данных; расчетный, на котором студенты обрабатывают полученные на втором этапе данные, проводят анализ результатов эксперимента и делают выводы. Если первый и третий этап можно без особых затруднений провести на рассмотренных нами ранее платформах онлайн-обучения, то второй этап предполагает доступ к оборудованию, что в условиях дистанционного обучения реализовать достаточно сложно. Многие преподаватели предоставляют студентам видеозаписи лабораторных экспериментов, что не заменяет студенту самостоятельной работы с оборудованием.

Для решения обозначенной проблемы могут быть использованы различные интернет-ресурсы и виртуальные лаборатории [4], позволяющих математически моделировать физические процессы, например, ProgramLab, MERLOT, PhET, VR CHEMISTRY LAB, STAR (MIT), Simulizator и другие. Данные ресурсы предназначены для формирования учебных заданий невысокой сложности. При этом организация лабораторных работ, направленных на формирование узких профессиональных знаний в той или иной предметной области, предполагает применение специализированного программного обеспечения.

Многие российские и зарубежные исследователи пытаются решить проблему проведения лабораторных работ по техническим направлениям подготовки в дистанционном формате, предлагая свои конкретные методики проведения лабораторных работ [5,6].

В Новоуральском технологическом институте - филиале НИЯУ МИФИ, осуществляющем подготовку студентов по направлениям «Электроника и наноэлектроника», «Промышленная электроника», «Мехатроника и робототехника», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Информатика и вычислительная техника» для проведения лабораторных работ используют программные продукты LabVIEW и SimInTech. В институте создана лаборатория National Instruments. Данная организация является одним из мировых лидеров в технологии виртуальных приборов и в разработке и изготовлении аппаратного и программного обеспечения для систем автоматизированного тестирования [7]. Программное обеспечение лаборатории включает программу LabVIEW, ориентированную на лабораторные исследования, измерения и сбор данных. Другой программный продукт - SimInTech - представляет собой среду динамического моделирования технических систем, предназначенную для расчётной проверки работы систем управления сложными техническими объектами. SimInTech позволяет осуществлять моделирование технологических процессов, протекающих в различных объектах, с одновременным моделированием системы управления, а также

повысить качество проектирования систем управления за счет проверки принимаемых решений на любой стадии проекта.

SimInTech предназначен для детального исследования и анализа процессов в энергоустановках, в системах автоматического управления, в следящих приводах и роботах, и в любых технических системах, описание динамики которых может быть представлено в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений и реализовано методами структурного моделирования [8].

Конечно, не все процессы, которые можно продемонстрировать в лабораториях института возможно смоделировать, особенно, если используются узкоспециализированное оборудование. Но, тем не менее, многие лабораторные работы по техническим дисциплинам можно проводить с помощью моделирующих программных продуктов. Это потребует дополнительных усилий, как со стороны преподавателя, так и со стороны студента. Но есть и свои плюсы, дополнительные навыки в моделировании будут востребованы у обучающихся в дальнейшем на производстве.

Использованные источники:

1. Что такое инновации? // РЕШЕНИЕ-ВЕРНОЕ.РФ URL: https://xn----dtbhaacat8bfloi8h.xn--p1ai/innovation-whois2 (дата обращения: 27.11.2022).
2. Дистанционное обучение // Википедия URL: http://surl.li/racu (дата обращения: 27.11.2022).
3. 8 лучших онлайн-ресурсов для лабораторных работ // vc.ru URL: https://vc.ru/education/139879-8-luchshih-onlayn-resursov-dlya-laboratornyh-rabot (дата обращения: 27.11.2022).
4. Обзор 7 платформ и сервисов для онлайн-обучения: возможности и решаемые бизнес-задач // ispring URL: https://www.ispring.ru/elearning-insights/platforma-onlain-obucheniya (дата обращения: 27.11.2022).
5. Салахова А.Ш., Козлов В.А. Организация и методика проведения дистанционных лабораторных работ по общепрофессиональным техническим дисциплинам // Открытое образование. 2014. №5. С.74-79.
6. Муравьев А.А., Маркова, Н.С., Грачева О.А. Методика проведения лабораторных работ по электротехническим дисциплинам в условиях дистанционного обучения // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова "ОБРАЗОВАНИЕ БУДУЩЕГО". 2020. С.78-84. 10.34708/GSTOU.CONF.2020.33.70.009.
7. National Instruments // Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/National_Instruments (дата обращения: 15.12.2022).
8. Здоровцов, А.Г. Изучение основ электроники и построение электрических цепей в программном обеспечении SimInTech / А.Г. Здоровцов // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2019. – № 7-8. С. 94-97.

ВЛИЯНИЕ ФОРМ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

Дьячков М.Р.
ФГАОУ ВО «Новоуральский технологический институт НИЯУ МИФИ», г. Новоуральск, Свердловская обл.
dyachkov.mixa@mail.ru

Данная статья посвящена изучению форм дистанционного обучения и их влияния на качество подготовки студентов технических направлений подготовки. Особенно это актуально на данный момент, когда в России происходит цифровая трансформация сферы высшего образования. Кроме того, пандемия новой коронавирусной инфекции ускорила процессы внедрения дистанционных технологий в образовательную деятельность. В связи с этим важно понимать все плюсы, а также нюансы дистанционного обучения, его влияние на качество образования.

Ключевые слова: дистанционная форма обучения, современные технологии, высшие учебные заведения, образовательный процесс.

INFLUENCE OF FORMS OF DISTANCE LEARNING ON THE QUALITY OF TRAINING OF STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITIES

Dyachkov M.R.
Novouralsk Technological Institute of the National Research Nuclear University "MEPhI", Novouralsk, Sverdlovsk Region
dyachkov.mixa@mail.ru

This article is devoted to the study of forms of distance learning and their impact on the quality of training of students of technical areas of training. This is especially relevant at the moment, when the digital transformation of higher education is taking place in Russia. In addition, the pandemic of a new coronavirus infection has accelerated the processes of introducing remote technologies into educational activities. In this regard, it is important to understand all the advantages, as well as the nuances of distance learning, its impact on the quality of education.

Key words: Distance learning, modern technologies, higher education institutions, educational process.

В эпоху бурного технологического развития компьютеризация охватила большую часть сфер жизнедеятельности современного общества: онлайн-покупки, автоматизация производства, роботизация, умные дома, города и многое другое - всё это направлено на улучшение качества жизни людей. Сфера образования не является исключением. Именно благодаря развитию информационно-коммуникационных технологий появилась возможность получения образования посредством дистанционного обучения.

Дистанционное обучение - образовательный процесс с применением технологий, обеспечивающих связь обучающихся и преподавателей на расстоянии, без непосредственного контакта [1]. В современных условиях дистанционное обучение осуществляется, в основном, посредством онлайн-технологий. Выделяют ряд положительных аспектов такого обучения [2]:

1) доступность и массовость – получение образования возможно в любом месте при наличии интернета и технических средств, обучающимся доступен широкий ассортимент образовательных программ;

2) гибкость - обучение может осуществляться как в режиме онлайн-конференций, так и посредством просмотра электронных материалов, что позволяет студентам гибко планировать свой учебный процесс;

3) экономичность – стоимость дистанционного обучения ниже, чем при использовании традиционных форм.

Несмотря на происходящую в настоящее время цифровизацию сферы образования, при внедрении дистанционного обучения, вузы сталкиваются с множеством проблем, в том числе технического и организационного характера. Одной из таких проблем является снижение качества подготовки студентов. Данная проблема обусловлена различными факторами, среди которых немаловажное значение имеет выбор формы дистанционного обучения. Как известно, в настоящее время существует три основные формы дистанционного обучения [3].

1. Синхронное обучение. Происходит с помощью онлайн-занятий, проводимых преподавателем по установленному расписанию. К таким формам обучения относятся: видеоконференции, видеолекции, веб-уроки, занятия в чате.

2. Асинхронное обучение. Студенты изучают материал и сдают тесты и контрольные работы к определенному сроку при минимальном участии преподавателя.

3. Смешанное обучение. Часть занятий предполагает изучение студентами учебных электронных в удобное для них время, а часть занятий проводится в режиме реального времени в онлайн-формате.

Правильный выбор формы дистанционного обучения позволяет наилучшим образом организовать образовательный процесс, наладить обратную связь со студентами, обеспечить эффективное усвоение материала. Особенно это актуально для технических вузов.

Автором проведено исследование удовлетворенности студентов качеством обучения в Новоуральском технологическом институте – филиале НИЯУ МИФИ (НТИ НИЯУ МИФИ). Институт осуществляет подготовку студентов по техническим направлениям. Целью исследование явилось определение используемых в образовательном процессе форм дистанционного обучения, а также их эффективность при преподавании технических дисциплин. В результате исследования было опрошено 183 студента технических направлений подготовки. На вопрос об отношении к дистанционному обучению большая часть респондентов ответила положительно (73%), при этом меньше половины студентов считают качество дистанционного обучения удовлетворительным (44,4%). Среди основных проблем дистанционного обучения отмечены такие, как несоответствие объема заданий и отводимого для их изучения времени (47,4%), недостаточный контроль получаемых знаний и умений (36,8%), отсутствие обратной связи (21,1%). При этом было выявлено, что неудовлетворенность качеством обучения у студентов 3-4 курсов выше, чем у первокурсников (30,8%). Это объясняется тем, что на старших курсах большую долю дисциплин составляют технические дисциплины. При изучении данных дисциплин у студентов возникают сложности как с изучением теоретического материала, так и с выполнением практических заданий и самостоятельных работ. Результаты опроса показывают, что существенным фактором, оказавшим влияние на низкую степень удовлетворенности студентов изучением технических дисциплин, является неправильный выбор форм дистанционного обучения (рисунок 1).

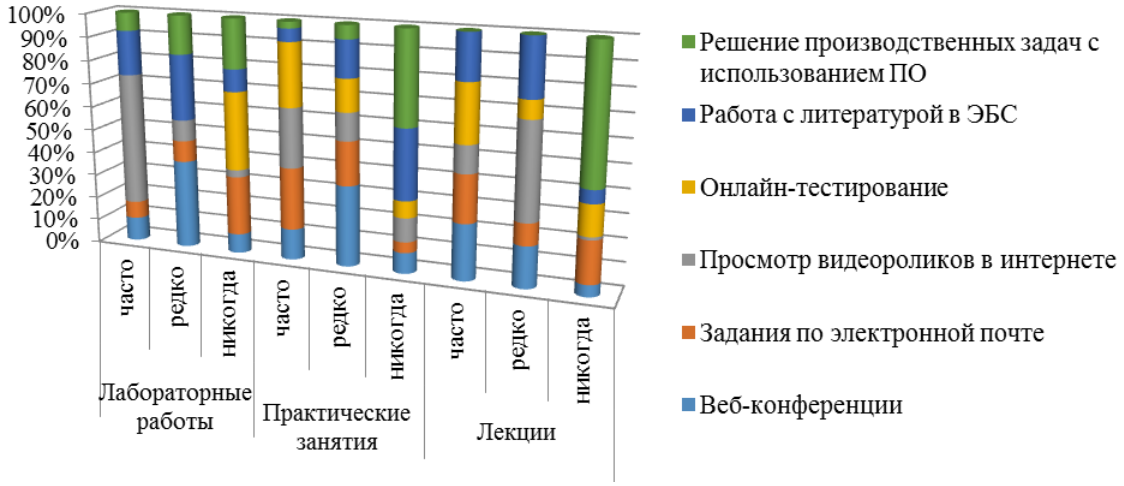


Рис.1. Частота использования различных форм дистанционного обучения

Участники анкетирования отмечают, что занятия не всегда проводятся в форме веб-конференций, зачастую отсутствует живое общение между студентами и преподавателями. Темы, требующие подробного объяснения, даются студентам на самостоятельное обучение в виде присланных по почте заданий, изучения учебников в электронно-библиотечных системах (ЭБС). Контроль полученных знаний проводится в форме онлайн-тестирования. Лабораторные работы в дистанционном формате заменяются просмотром учебных видеороликов или изучением учебников. Практически не используется специализированное программное обеспечение.

Несмотря на все выявленные в процессе исследования проблемы качества дистанционного обучения, полученные результаты анкетирования студентов свидетельствуют о положительном восприятии данной формы обучения. Для повышения качества дистанционного обучения следует решить множество вопросов, среди которых особое внимание заслуживает выбор формы дистанционного обучения в зависимости от специфики дисциплин.

Использованные источники:

1. Дистанционное обучение // Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Дистанционное_обучение (дата обращения: 13.11.22).
2. Плюсы и минусы дистанционного обучения в вузе // Zaochnik.ru URL: https://zaochnik.ru/blog/pljusy-i-minusy-distantsionnogo-obuchenija-v-vuze/ (дата обращения: 13.11.22).
3. Шевченко О.И., Ивко В.И. Формы дистанционного обучения в вузе // Инновационная наука. 2018. №12. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/formy-distantsionnogo-obucheniya-v-vuze (дата обращения: 18.11.2022).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ РАБОЧИХ ЛИСТОВ КАК ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ИНОЯЗЫЧНОЙ КОММУНИКАТИВНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

Захарова О.О.
ФГАОУ ВО «Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
osja90@bk.ru

В статье обозначена проблема обновления процедуры контроля уровня сформированности иноязычной коммуникативной компетенции студентов технического вуза. Отмечены преимущества и обозначены методические особенности применения электронных рабочих листов как инструмента осуществления текущего контроля в ходе работы студентов по дисциплине «Иностранный язык».

Ключевые слова: контроль, английский язык, иноязычная коммуникативная компетенция, электронные рабочие листы, студенты технического вуза.

THE USE OF ELECTRONIC WORKSHEETS AS AN EFFICIENT WAY TO ASSESS ENGINEERING STUDENTS` FOREIGN LANGUAGE COMMUNICATIVE COMPETENCE LEVEL DEVELOPMENT

Zakharova O.O.
Tryokhgorny Technological Institute – a branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region
osja90@bk.ru

The article emphasizes the problem of renovation of control procedure for the level of engineering students` foreign language communicative competence development. The advantages as well as the methodical peculiarities of electronic worksheets use as a tool to implement continuous assessment in the process of students` work on “the Foreign Language” are given.

Key words: assessment, the English language, foreign language communicative competence, electronic worksheets, engineering students.

Вопрос повышения качества обучения иностранному языку студентов технического вуза в условиях интеграции научных знаний и внедрения информационных технологий в образовательный процесс является актуальным сегодня. Качественная иноязычная подготовка студентов обеспечивается при систематическом мониторинге сформированности у них иноязычной коммуникативной компетенции и непрерывном взаимодействии преподавателя и обучающегося при реализации комплекса задач, то есть качество обучения определяется грамотной и целесообразной организацией способов контроля.

В научно-методической литературе под контролем понимается процесс выявления уровня сформированности знаний, умений, навыков студентов в ходе выполнения ими заданий разных типов и определения оценки за изученный материал [2]. Помимо диагностической и оценочной функций контроль выполняет обучающую (средство совершенствования знаний), воспитательную (способ обеспечения дисциплины студентов) [3] и корректирующую (принятие решений в организационно-управленческой деятельности) функции [4]. В условиях развития цифровых образовательных технологий и актуализации

роли дисциплины «Иностранный язык» в техническом вузе повышается интерес исследователей к вопросу совершенствования процедуры контроля сформированности у студентов – будущих инженеров иноязычной коммуникативной компетенции. Подчеркивая проблему использования неактуальных для современной образовательной деятельности форм контроля, В.В. Аверьянова описывает возможности организации текущего контроля с помощью интерактивных платформ Quizlet, Learning Apps [1]. Среди современных инструментов, обеспечивающих текущий контроль усвоения материала дисциплины «Иностранный язык», также выделяется LMS Moodle [5], возможности которой позволяют отслеживать динамику изменений уровней сформированности комплекса умений и навыков студентов по разным видам речевой деятельности. Несмотря на многообразие возможностей использования современных форм контроля в цифровой образовательной среде в научной литературе отсутствует четкое обоснование эффективного сочетания традиционных и инновационных способов контроля, форматов их использования в условиях как очной, так и дистанционной работы. Данное противоречие указывает на **проблему** работы, которую составляет необходимость уточнения методических способов организации контроля за уровнем сформированности иноязычной коммуникативной компетенции студентов технического вуза. **Цель настоящей работы** – описать возможности использования электронных рабочих листов как эффективного способа организации контроля работы студентов по дисциплине «Иностранный язык».

Важной особенностью контроля формирования иноязычной коммуникативной компетенции студентов является то, что он тематически обусловлен, поскольку тематический принцип организации материала по иностранному языку выступает значимым в процессе преподавания данной дисциплины. Объектом контроля при обучении английскому языку студентов технического вуза является совокупность англоязычных знаний, умений, навыков и мотивов в составе иноязычной коммуникативной компетенции, определяющих успешное взаимодействие в профессиональной среде.

Применение рабочих листов (worksheets) представляет актуальный способ осуществления текущего контроля за работой студентов. Под электронным рабочим листом понимается цифровое средство организации самостоятельной учебной деятельности студента при использовании облачных сервисов и веб-инструментов [7]. Обосновывая эффективность применения рабочих листов в ходе организации занятий со студентами, исследователи [6, 7] отмечают методические преимущества данного обучающего средства: рабочие листы позволяют индивидуализировать образовательную деятельность, поскольку создаются преподавателем на основе конкретных методических целей для организации работы с определенной группой учащихся; использование интерактивных рабочих листов позволяет проводить автоматическую проверку и получать быструю обратную связь от студента; рабочие листы способствуют визуализации материала, включению в него мультимедиа-файлов, обеспечивая работу студентов с разными типами заданий; при работе с рассматриваемыми способами контроля актуализируется субъектная позиция обучающегося, так как выполнение заданий рабочего листа требует активного включения в процесс работы.

Материалом для исследования выступил опыт внедрения интерактивных рабочих листов в процесс обучения «Иностранному языку» студентов 1-2 курсов Трехгорного технологического института в течение двух семестров. В ходе методического эксперимента были разработаны рабочие листы для обеспечения процедуры проведения текущего контроля уровня сформированности у студентов иноязычной коммуникативной компетенции. Создание рабочих листов осуществлялось на основе платформ Liveworksheets, Wizer.me, позволяющих визуализировать материал и включить упражнения разных типов. С использованием инструментов обозначенных интерактивных платформ разработаны упражнения контроля следующих типов:

- грамматические упражнения (трансформационные, подстановочные);
- языковые лексические упражнения (трансформация формы слова, соотношение лексических единиц, их синонимов и антонимов, поиск некорректного употребления слова);

- условно-речевые упражнения на основе профессионально-ориентированного текста (вопросно-ответные упражнения, реферирование текста, определение ключевых слов, выбор правильного ответа в соответствии с идеями текста);
- аудитивные упражнения (задания в ходе/после просмотра видео/прослушивания аудиотекста: определение верных или неверных утверждений, выражение собственного мнения, реферирование идей аудиотекста).

Систематический мониторинг позволяет заявлять, что при регулярном использовании электронных рабочих листов достигается прирост в уровнях сформированности иноязычной коммуникативной компетенции студентов. Стоит обозначить, что применение электронных рабочих листов дисциплинирует работу обучающихся, позволяя им возвращаться к самостоятельному повторению материала аудиторной работы, а также решает проблему недостаточного количества тренировочных упражнений, характерную для многих учебников по техническому английскому языку. Педагогическими условиями, определяющими результативность внедрения рабочих листов в англоязычное образование студентов, являются: применение технологии BYOD (bring your own device), что обеспечивает быстрый доступ к интерактивным материалам; системная организация работы студентов с тематическим материалом, что способствует развитию комплекса умений и навыков студента; использование вариативных заданий при составлении рабочих листов, что позволяет поддерживать мотивацию будущих инженеров к изучению английского языка.

Таким образом, внедрение электронных рабочих листов в качестве способа осуществления контроля уровня сформированности иноязычной коммуникативной компетенции студентов – будущих инженеров позволяет оптимизировать процесс обучения английскому языку при обеспечении обучающихся инструментом для проверки собственных знаний и умений.

Использованные источники:

1. Аверьянова, В.В. Инновационные формы контроля при обучении иностранному языку [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/341459109_INNOVACIONNYE_FORMY_KONTROLA_PRI_OBUCENII_INOSTRANNOMU_AZYKU (дата обращения: 25.12.2022).
2. Андрух, А.О. Принципы контроля и оценивания иноязычной коммуникативной компетенции // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2019. – Т. 24. – № 179. – С. 51-57.
3. Жарина, О.А., Моргун, Н.Ю. Специфика и роль контроля при обучении английского языка в вузе // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2020. – Т. 9. – № 2 (31). – С. 173-176.
4. Жебровская, О.Н. Контроль как деятельность и форма управляемого обучения студентов // Евразийский Союз ученых. – 2017. – № 12-3 (45). – С. 7-9.
5. Минеева, О.А., Клопова, Ю.Б., Борщевская, Ю.М. Организация и проведение текущего контроля при обучении иностранному языку с помощью LMS Moodle // Филологические науки. Вопросы теории и практики. – 2017. – № 1 (67). – Ч. 2. – С. 210-212.
6. Миренкова, Е.В. Рабочий лист как средство организации самостоятельной познавательной деятельности в естественно-научном образовании // Ценности и смыслы. – 2021. – №1 (71). – С. 115-130.
7. Процак, Е.С. Использование он-лайн сервиса Wizer как средство организации учебной деятельности на уроках иностранного языка // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Дидактика сетевого урока», 2-3 декабря 2021 г.: Минск, 2022.

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Исупова А.А.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.
anna_isupova@icloud.com

В докладе представлен обзор ключевых уравнений состояния реального газа, описаны области применимости рассматриваемых уравнений.

Ключевые слова: уравнение состояния, реальный газ, уравнение Ван-дер-Ваальса, критические параметры.

EQUATIONS OF STATE OF A REAL GAS

Isupova A.A.
Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIITF im. academician E.I. Zababakhina, Snezhinsk, Chelyabinsk region
anna_isupova@icloud.com

The report presents an overview of the key equations of state of a real gas, describes the areas of applicability of the equations under consideration.

Key words: equation of state, real gas, Van der Waals equation, critical parameters.

Уравнениями состояния называются уравнения вида [1]:

$$\varphi(P, V, T, m) = 0 \qquad (1)$$

Уравнение состояния в компактной аналитической форме содержит широкую информацию о различных свойствах вещества. С помощью уравнения состояния можно: вычислить значения теплоемкостей C_p или C_V, термические коэффициенты $\alpha_T, \beta_P, \gamma$, скорость звука в зависимости от параметров состояния; можно исследовать температурную зависимость физических констант; теоретически обоснованное уравнение состояния позволяет на основе данных по термическим свойствам вещества получить представление о межмолекулярном взаимодействии и других микросвойствах вещества [2].

Таким образом, роль уравнения состояния в науке велика и отыскание рациональной формы уравнения, способного правильно описать термодинамическое поведение вещества в широкой области параметров состояния, приобретает большое значение.

Уравнение состояния идеального газа

Уравнение состояния Менделеева-Клапейрона имеет широкую базу экспериментальных подтверждений для области давлений, незначительно превышающих атмосферное давление, а также для диапазона плотностей газов, близких к плотности атмосферного воздуха. Таким образом, для описания многих процессов и явлений применение уравнения Менделеева-Клапейрона является эффективным. Однако при описании газов, сильно отличающихся по свойствам от атмосферного воздуха, уравнение Менделеева-Клапейрона становится неэффективным как исходя из недостаточной экспериментальной базы, так и учитывая те свойства, которые газ приобретает при высоких давлениях, низких температурах и высокой плотности. Такие свойства можно обозначить как свойства реального газа. Они возникают вследствие взаимодействия молекул газа между собой. Для описания реальных газов необходимо применять уравнения состояния реального газа [3].

Уравнение Ван-дер-Ваальса

Особого внимания заслуживает уравнение состояния, предложенное в 1873 г. голландским физиком Ван-дер-Ваальсом [4]:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \tag{3}$$

Это уравнение отличается от уравнения Менделеева-Клайперона двумя поправками: объемной поправкой b и поправкой на так называемое внутреннее давление a/V^2.

Связь между критическими параметрами и постоянными в уравнении Ван-дер-Ваальса:

$$a = 3P_cV_c^2, \qquad b = \frac{V_c}{3}, \qquad R = \frac{8}{3}\frac{P_cV_c}{T_c}, \qquad s = \frac{RT_c}{P_cV_c} = \frac{8}{3} = 2{,}67 \tag{4}$$

Отступления уравнения Ван-дер-Ваальса от эксперимента: в эксперименте установлено, что a и b являются функциями температуры, хотя из уравнения этого не следует; согласно уравнению Ван-дер-Ваальса, критический параметр одинаков для всех веществ, однако значение этого коэффициента для различных веществ колеблется в пределах от 3 до 4; соотношение $b = V_c/3$ не выполняется; уравнение Ван-дер-Ваальса хорошо описывает однофазные однокомпонентные системы и расходится с опытом в области двухфазных состояний.

Однако указанные отступления от эксперимента не снижают ценность уравнения Ван-дер-Ваальса.

Уравнение Клаузиуса

Уравнение Клаузиуса, полученное в 1880 году, представляет собой видоизмененное уравнение Ван-дер-Ваальса, которое приводит к лучшему согласию с опытом. Внутреннее давление, помимо более сложной зависимости от V, зависит еще и от T[5]:

$$P = \frac{a}{T(V+b)^2}, \qquad \left(P + \frac{a}{T(V+b)^2}\right)(V - b) = RT. \tag{5}$$

Уравнение Клаузиуса содержит 4 постоянных – a, b, c, R, значение которых связано с критическими параметрами следующим образом:

$$P_c = \frac{RT_c}{8(b+c)}; \quad V_c = 3b + 2c; \quad T_c = \sqrt{\frac{8a}{27R(b+c)}}, \qquad s = \frac{RT_c}{P_cV_c} = 3{,}75. \tag{6}$$

Уравнение Бертло

Уравнение Бертло – двухпараметрическое уравнение состояние реального газа, опубликованное Д.Бертло в 1899 году как модификация уравнения Ван-дер-Ваальса. Уравнение может быть записано в виде [6]:

$$RT = \left(P + \frac{a}{TV^2}\right)(V - b) \tag{7}$$

Связь между критическими параметрами и постоянными:

$$a = 3T_cP_cV_c^2, \qquad b = {}^{V_c}/_{3}, \qquad s = \frac{P_cV_c}{RT_c} = \frac{3}{8} = 0{,}375 \tag{8}$$

Уравнение Бертло вблизи критической точки не имеет никаких преимуществ по сравнению с уравнением Ван-дер-Ваальса. Зато при умеренных давлениях оно лучше согласуется с опытом.

Уравнение Дитеричи

В 1880 г. Дитеричи [7] предложил различать объемную, поверхностную и линейную плотность. Линейная плотность пропорциональна количеству молекул, расположенных вдоль линии и равна кубическому корню из объемной плотности. Поверхностная плотность – квадратный корень из объемной плотности.

$$\left(P + \frac{a}{V^{5/3}}\right)(V - b) = RT \tag{9}$$

Для критического состояния параметры имеют вид:

$$P_c = \frac{a}{4(4b)^{5/3}};\ V_c = 4b;\ T_c = \frac{15ab}{4R(4b)^{5/3}};\quad s = \frac{RT_c}{P_cV_c} = \frac{15}{4} = 3{,}75 \qquad (10)$$

Позднее было установлено, что внутренне давление зависит не только от плотности, но и от температуры, что еще больше осложняет дело. Этого уравнение Дитеричи не учитывает.

Уравнение Ван-Лаара

В 1924 году Ван-Лаар [5,6] предложил свое уравнение состояния для реального газа. Он сохранил общую форму уравнения Ван-дер-Ваальса, но предположил, что a и b являются функциями объема и температуры:

$$\left(P + \frac{a_g}{V(V+c)}\right)\cdot(V-c) = RT, c = \frac{b_g}{1+\frac{b_g - b_0}{V}}, a_g = a_\infty e^{\frac{\alpha}{RT}}, b_g = b_\infty e^{\frac{\alpha}{RT}} \qquad (11)$$

Уравнение хорошо описывает поведение некоторых реальных газов при больших давлениях и при подходе к конденсации. Уравнение применимо также и к жидкостям. Однако вблизи критической точки, при очень больших давлениях (для H_2 $P > 1000$ атм.), а также при больших объемах уравнение расходится с экспериментом.

Уравнение Битти-Бриджмена

Уравнение Битти-Бриджмена [8] является одним из лучших эмпирических уравнений состояния вплоть до давлений порядка 250 атм.

$$P = \frac{RT\left(1-\frac{c}{VT^3}\right)}{V^2}\left[V + B_0\left(1-\frac{b}{V}\right)\right] - \frac{A_0}{V^2}\left(1-\frac{a}{V}\right), \qquad (12)$$

где A_0, a, b, B_0, c – эмпирические константы, значения которых следует определить из экспериментальных данных. Уравнение очень точно до тех пор, пока его применение ограничено условиями, для которых определялись константы.

Уравнение состояния в вириальной форме

Это самое общее уравнение состояния реальных газов, наиболее полно отражающее все их свойства [9], хотя его применение весьма затруднительно из-за математических трудностей.

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \frac{D(T)}{V^3} + \cdots \qquad (13)$$

Вириальные коэффициенты характеризуют взаимодействия определенного числа молекул: $B(T)$ – двух, $C(T)$ – трех, $D(T)$ – четырех и т.д.

Методами статистической физики можно вычислить вириальные коэффициенты, если известен потенциал межмолекулярного взаимодействия. Однако, из-за сложности механизма взаимодействия сведения о потенциале межмолекулярных сил являются, как правило, ограниченными. Поэтому даже для простых потенциалов удалось вычислить лишь несколько первых вириальных коэффициентов. Такое уравнение описывает лишь область невысоких плотностей (особенно при низких температурах).

Заключение

Поиск уравнения состояния вещества является одной из фундаментальных задач термодинамики и статистической физики. К концу XX века были предложены более сотни различных уравнений состояния. Однако они не обладают достаточной общностью и универсальностью, поэтому поиск новых, более совершенных, уравнений состояния не прекращается.

Использованные источники:

1. Додж Б.Ф. Химическая термодинамика в применении к химическим процессам и химической технологии / Б.Ф. Додж. М.: Изд-во иностранной литературы. 1950. – 786 с.

2. Голик А.З., Сысоев В.М. Исследование связи теплофизических свойств вещества с параметрами межмолекулярного взаимодействия на основе уравнения Тэйта. / А.З. Голик, В.М. Сысоев / ТВТ. 1983. Т. 21, № 3. С. 454–459.
3. Шмидт Э. Введение в техническую термодинамику. пер. с нем./ Э. Шмидт. ; под ред. М.П. Вукаловича. – Москва; Ленинград: Энергия. 1965. – 392 с.
4. Белонучкин В.Е. Краткий курс термодинамики / В.Е. белонучкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МФТИ, 2019. – 164 с.
5. Корзун И.Н., Поярков И.В. Физика реального газа и жидкости : учебное пособие / И.Н. Корзун, И.В. Поярков ; КазНУ им. Аль-Фараби. – Алматы : Қазақ университеті, 2007. – 165 с.
6. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. Ч. 1 — М.: Мир, 1989. — 304 с.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физка. / Д.В. Сивухин. Т.2. М.: Наука, 1990. – 591 с.
8. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова — 3-е изд. — Л.: Химия, 1982. — 592 с.
9. Путилов К.А. Термодинамика. / К.А. Путилов. М.: Наука,1971 г. 376 с

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ТИПА ТОРНАДО

Казачинский А.О.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.
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 инициировании закрутки потока силой Кориолиса – являющейся инерционной силой, возникающей от вращения Земли вокруг своей оси.

Ключевые слова: Восходящий закрученный поток, численное моделирование, математические модели, сила Кориолиса.

SIMULATION OF UNSTATIONARY CURRENT FLOW OF A TORNADO TYPE

Kazachinsky A.O.
Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region
a.kazachinskij@gmail.com

The study is devoted to the numerical modeling of a mathematical model for the study of complex polytropic gas flows in ascending swirling air flows. The model considers in detail the processes of emergence and development of three-dimensional stationary air movement, when the flow is swirled by the Coriolis force, which is an inertial force arising from the rotation of the Earth around its axis.

Key words: Upward swirling flow, numerical simulation, mathematical models, Coriolis force.

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.

ДВУМЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ В ВИДЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ

Карелина О.А.[1], Баутин С.П.[1], Обухов А.Г.[2]
[1] *ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.,*
[2] *ФГАОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Тюменская обл.*
karelina-1999@inbox.ru

В работе описана методика представлений решений системы нелинейных уравнений движения в виде бесконечных тригонометрических рядов от двух пространственных переменных. Коэффициенты рядов являются искомыми функциями от времени. Предложена процедура получения бесконечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, решения которых задают искомые коэффициенты рядов.

Ключевые слова: Система уравнений Навье-Стокса, нелинейное уравнение движения, система обыкновенных дифференциальных уравнений, тригонометрические ряды, коэффициент ряда.

TWO-DIMENSIONAL SOLUTIONS OF EQUATIONS OF MOTION IN THE FORM OF TRIGONOMETRIC SERIES

Karelina O.A.[1], Bautin S.P[1]., Obukhov A.G.[2]
[1] *MEPI National Nuclear Research University's Snezhinsk Physicotechnical Institute, Chelyabinsk Region*
[2]*Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Tyumen Industrial University"*
karelina-1999@inbox.ru

The paper describes the methodology of representing the 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 of time. A procedure for obtaining infinite systems of ordinary differential equations, the solutions of which set the required coefficients of the series, is proposed.

Key words: System of Navier-Stokes equations, nonlinear equation of motion, system of ordinary differential equations, trigonometric series, series factor.

Введение.

В работе описана методика представлений решений системы нелинейных уравнений движения в виде бесконечных тригонометрических рядов от двух пространственных переменных. Коэффициенты рядов являются искомыми функциями от времени. Предложена процедура получения бесконечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, решения которых задают искомые коэффициенты рядов.

В качестве математическом модели для приближенной передачи движений газа далее из полной системы уравнений Навье-Стокса исследуются только уравнения движения в предположении постоянных значений термодинамических параметров - плотности p = 1 и температуры T =1:

$$V_t + (V \cdot \nabla)V = \mu_0 \left[\frac{1}{4}\nabla(\operatorname{div} V) + \frac{3}{4}\Delta V\right]. \qquad (1)$$

В системе (1) введены безразмерные переменные. При этом за масштаб скорости u00 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 третей компоненты вектора скорости газа:

$$\frac{\partial}{\partial z} = 0;\ \upsilon_3 = 0$$

и вводятся обозначения: $u = \upsilon_1, \upsilon = \upsilon_2$. В этом случае система (1.1) в подробной записи имеет следующий вид

$$\begin{cases} u_t + uu_x + \upsilon u_y = \mu_0 \left(u_{xx} + \frac{3}{4} u_{yy} + \frac{1}{4} u_{xy} \right), \\ \upsilon_t + u\upsilon_x + \upsilon\upsilon_y = \mu_0 \left(\frac{3}{4} \upsilon_{xx} + \upsilon_{yy} + \frac{1}{4} u_{xy} \right). \end{cases} \quad (2)$$

а третье уравнение системы (1) выполняется тождественно.

Далее о системе (2) и будет говориться как о системе уравнений движения.

Представление решений рассматриваемой системы уравнений

В монографии [3] 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 монографий [2, 3] используются следующие представления искомых функций u, v:

$$\begin{aligned} u(t,x,y) &= u_1(t,x) + u_2(t,y) = \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u_{m,2}(t) \sin(my), \\ \upsilon(t,x,y) &= \upsilon_1(t,x) + \upsilon_2(t,y) = \sum_{k=1}^{\infty} \upsilon_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} \upsilon_{m,2}(t) \sin(my). \end{aligned} \quad (3)$$

У искомых 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*.

Для проведения подстановки представлений (3) в систему (2) вначале выписываются выражения для частных производных этих функций:

$$u_t = \sum_{k=1}^{\infty} u'_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u'_{m,2}(t) \sin(my),$$

$$u_x = \sum_{k=1}^{\infty} k u_{k,1}(t) \cos(kx),\ \ u_y = \sum_{m=1}^{\infty} m u_{m,2}(t) \cos(my),$$

$$u_{xx} = -\sum_{k=1}^{\infty} k^2 u_{k,1}(t) \sin(kx),\ u_{xy} = 0, u_{yy} = -\sum_{m=1}^{\infty} m^2 u_{m,2}(t) \sin(my),$$

$$\upsilon_t = \sum_{k=1}^{\infty} \upsilon'_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} \upsilon'_{m,2}(t) \sin(my),$$

$$\upsilon_x = \sum_{k=1}^{\infty} k \upsilon_{k,1}(t) \cos(kx),\ \ \upsilon_y = \sum_{m=1}^{\infty} m \upsilon_{m,2}(t) \cos(my),$$

$$v_{xx} = -\sum_{k=1}^{\infty} k^2 v_{k,1}(t)\sin(kx)\,,\ v_{xy} = 0, v_{yy} = -\sum_{m=1}^{\infty} m^2 v_{m,2}(t)\sin(my)\,.$$

В системе (2) в левых частях обоих уравнений оставим только частные производные по времени, а все остальные слагаемые из левых частей перенесем в правые части рассматриваемых уравнений, то есть запишем систему (2) в нормальной форме:

$$\begin{cases} u_t = -uu_x - vu_y + \mu_0\left(u_{xx} + \frac{3}{4}u_{yy} + \frac{1}{4}u_{xy}\right), \\ v_t = -uv_x - vv_y + \mu_0\left(\frac{3}{4}v_{xx} + v_{yy} + \frac{1}{4}u_{xy}\right). \end{cases} \tag{4}$$

В систему (4) подставляются представления (3) и выписанные выше выражения для производных:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{\infty} u'_{k,1}(t)\sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u'_{m,2}(t)\sin(my) = \\ = -\left[\sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}(t)\sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u_{m,2}(t)\sin(my)\right]\cdot\left[\sum_{k=1}^{\infty} ku_{k,1}(t)\cos(kx)\right] - \\ -\left[\sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}(t)\sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v_{m,2}(t)\sin(my)\right]\cdot\left[\sum_{m=1}^{\infty} mu_{m,2}(t)\cos(my)\right] + \\ +\mu_0\left[-\sum_{k=1}^{\infty} k^2 u_{k,1}(t)\sin(kx) - \frac{3}{4}\sum_{m=1}^{\infty} m^2 u_{m,2}(t)\sin(my)\right], \\ \sum_{k=1}^{\infty} v'_{k,1}(t)\sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v'_{m,2}(t)\sin(my) = \\ -\left[\sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}(t)\sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u_{m,2}(t)\sin(my)\right]\cdot\left[\sum_{k=1}^{\infty} kv_{k,1}(t)\cos(kx)\right] - \\ -\left[\sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}(t)\sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v_{m,2}(t)\sin(my)\right]\cdot\left[\sum_{m=1}^{\infty} mv_{m,2}(t)\cos(my)\right] + \\ +\mu_0\left[-\frac{3}{4}\sum_{k=1}^{\infty} k^2 v_{k,1}(t)\sin(kx) - \sum_{m=1}^{\infty} m^2 v_{m,2}(t)\sin(my)\right]. \end{cases} \tag{5}$$

Рассмотрим процедуру преобразования системы (5) на первом уравнении. Для начала в первом уравнении системы (5) раскроем скобки, а затем перепишем через двойные суммы в нужных местах, получим уравнение вида:

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^{\infty} u'_{k,1}(t)\sin(kx) + \sum_{k=1}^{\infty} u'_{k,2}(t)\sin(ky) = \\ &= -\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} mu_{k,1}(t)u_{m,1}(t)\sin(kx)\cos(mx) - \\ &-\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} ku_{m,2}(t)u_{k,1}(t)\sin(my)\cos(kx) - \\ &-\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} mv_{k,1}(t)u_{m,2}(t)\sin(kx)\cos(my) - \end{aligned} \tag{6}$$

$$-\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} kv_{m,2}(t)u_{k,2}(t)\sin(my)\cos(ky) -$$

$$-\mu_0\sum_{k=1}^{\infty} k^2u_{k,1}(t)\sin(kx) - \frac{3}{4}\mu_0\sum_{k=1}^{\infty} k^2u_{k,2}(t)\sin(ky)$$

Аналогичные действия проделываем со вторым уравнение системы (5). После этого полученные уравнения спроецируем на базис $\{\sin(x), \sin(2x), \sin(3x), \dots\}$. Для этого каждое полученное уравнение последовательно умножается на $\sin(\ell x)$, $\ell = 1,2,3, \dots$, а затем каждое из полученных соотношений интегрируется по x и по y на своих отрезках от $-\pi$ до $+\pi$. Рассмотрим на примере уравнения (6):

$$\sum_{k=1}^{\infty}\left[u'_{k,1}(t)\int_{-\pi}^{\pi}\sin(kx)\sin(\ell x)\,dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}dy\right] +$$

$$+\sum_{k=1}^{\infty}\left[u'_{k,2}(t)\int_{-\pi}^{\pi}\sin(\ell x)\,dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}\sin(ky)dy\right] =$$

$$=$$

$$= -\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[mu_{k,1}(t)u_{m,1}(t)\int_{-\pi}^{\pi}\sin(kx)\sin(\ell x)\cos(mx)\,dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}dy\right] -$$

$$-\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[ku_{m,2}(t)u_{k,1}(t)\int_{-\pi}^{\pi}\cos(kx)\sin(\ell x)\,dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}\sin(my)dy\right] -$$

$$-\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[mv_{k,1}(t)u_{m,2}(t)\int_{-\pi}^{\pi}\sin(kx)\sin(\ell x)dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}\cos(my)\,dy\right] - \tag{7}$$

$$-\sum_{k=1}^{\infty}\left[\sum_{m=1}^{\infty} kv_{m,2}(t)u_{k,2}(t)\int_{-\pi}^{\pi}\sin(\ell x)\,dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}\sin(my)\cos(ky)dy\right] -$$

$$-\mu_0\sum_{k=1}^{\infty} k^2u_{k,1}(t)\left[\int_{-\pi}^{\pi}\sin(\ell x)\sin(kx)\,dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}dy\right] -$$

$$-\frac{3}{4}\mu_0\sum_{k=1}^{\infty}\left[k^2u_{k,2}(t)\int_{-\pi}^{\pi}\sin(\ell x)dx\cdot\int_{-\pi}^{\pi}\sin(ky)dy\right]$$

Далее находим значения конкретных интегралов:

$$\int_{-\pi}^{\pi}\sin(kx)\sin(\ell x)\,dx = 0, \text{если } k \neq \ell;\ \int_{-\pi}^{\pi}\sin^2(\ell x)\,dx = \pi;\ \int_{-\pi}^{\pi}\sin(\ell y)\,dy$$

$$= 0;\ \int_{-\pi}^{\pi}\sin(\ell x)\,dx = 0;$$

$$\int_{-\pi}^{\pi}\sin(mx)\cos(ky)\,dx = 0.$$

$$\int_{-\pi}^{\pi}\sin(kx)\sin(\ell x)\cos(mx)\,dx = \frac{\pi}{2}b_{k\ell m},$$

где константа $b_{k\ell m}$ принимает следующее значение

$$b_{k\ell m} = \begin{cases} 1, \text{если } m = |k-\ell|; \\ -\ 1, \text{если } m = k+\ell; \\ 0, \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

В результате проецирования уравнения (6) на базис$\{\sin(x), \sin 2(x), \sin(3x), \dots\}$ получилась следующая бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений для бесконечного числа искомых функций $u_{\ell,1}(t), \ell = 1,2,3, \dots$:

$$u'_{\ell,1} = -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} m u_{k,1}(t) u_{m,1}(t) b_{k\ell m} - \mu_0 \ell^2 u_{\ell,1};\ \ell = 1,2,3, \dots \tag{8}$$

В каждое уравнение бесконечной системы (8) входит бесконечное число искомых функций - только $u_{k,1}(t)$ Система (8 имеет нормальный вид относительно производных $u'_{\ell,1}(t), \ell = 1,2,3, \dots$

Аналогичным образом проецируем второе уравнение системы (5) на базис $\{\sin(x), \sin(2x), \sin(3x), \dots\}$, а затем каждое из полученных соотношений интегрируется по x и по y на своих отрезках от $-\pi$ до $+\pi$.

После этого оба уравнения системы (5), по алгоритму, описанному выше, проецируем на базис $\{\sin(y), \sin(2y), \sin(3y), \dots\}$, а затем каждое из полученных соотношений интегрируется по x и по y на своих отрезках от $-\pi$ до $+\pi$.

В итоге получается четыре бесконечные системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$u'_{\ell,1} = -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} m u_{k,1}(t) u_{m,1}(t) b_{k\ell m} - \mu_0 \ell^2 u_{\ell,1};\ \ell = 1,2,3, \dots \tag{9}$$

$$u'_{\ell,1} = -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} m u_{k,1}(t) v_{m,1}(t) b_{k\ell m} - \frac{3}{4}\mu_0 \ell^2 v_{\ell,1};\ \ell = 1,2,3, \dots \tag{10}$$

$$u'_{\ell,2} = -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} k v_{m,2}(t) u_{k,2}(t) b_{k\ell m} - \frac{3}{4}\mu_0 \ell^2 u_{\ell,2};\ \ell = 1,2,3, \dots \tag{11}$$

$$u'_{\ell,2} = -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} k v_{k,2}(t) u_{m,1}(t) b_{k\ell m} - \mu_0 \ell^2 v_{\ell,1};\ \ell = 1,2,3, \dots \tag{12}$$

Заметим, что система (9)-(12) достаточно специфически расщепилась:

1) в систему уравнений (9) входят только искомые $u_{k,1}$ и эту систему можно решать отдельно от систем (10)-(12);

2) в системы (9), (10) входят искомые со вторым индексом «единица» и искомые из систем (9), (10) стоят в разложении (3) перед гармониками, зависящими только от x;

3) если система (9) решена и $u_{k,1}$ известны, то система (10) становится системой, куда входят только искомые $v_{k,1}$ и, следователвно ее тоже можно решать отдельно;

4) в систему уравнений (12) входят только искомые $v_{k,2}$ и эту систему можно решатв отделвно от систем (9)—(11);

5) в системах (11), (12) входят искомые со вторым индексом «двойка» и искомые из систем (11), (12) стоят в разложении (3) перед гармониками, зависящими только от y;

6) если система (12) решена и $v_{k,2}$ известны, то система (11) становится системой, куда входят только искомые $u_{k,2}$ и, следовательно ее тоже можно решать отдельно.

7) из приведенных пунктов следует, что при нахождении коэффициентов разложений (3) решаемые задачи разделились по пространственным переменным - можно

отдельно находить коэффициенты, стоящие перед гармониками, зависящими только от пространственной переменной x и отдельно можно находить коэффициенты в рядах, зависящих от пространственной переменной y.

Заключение.

На примере системы из двух уравнений движения разработана методика представления решений нелинейных систем уравнений с частными производивши в виде бесконечных тригонометрических рядов от двух пространственных переменных. Искомые коэффициенты рядов зависят от времени. Получена бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений, решения которых и определяют искомые коэффициенты.

Использованные источники:

1. Ковалевская С.В. Научные труды. К теории дифференциальных уравнений с частными производными. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 368 с.
2. Баутин С. П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. Новосибирск: Наука, 2009. 368 с.
3. 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.
4. Баутин С.П. Аналитическая тепловая волна. М.: Физматлит, 2003. 88 с.
5. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Сходимости бесконечных тригонометрических рядов, решающих уравнение Бюргерса. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. 34 с.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСЧЁТНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

Кононов С.Н.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
kononovsn@susu.ru

В работе представлена задача визуализации результатов численных расчётов газодинамических параметров. Вычисления ведутся в цилиндрических координатах для нестационарного режима при организации продува воздуха сверху. Расчётные значения температуры, плотности и векторов скорости в цилиндрической сетке визуализируются линиями тока, изоповерхностями и градиентами расчётных параметров воздуха.

Ключевые слова: полная система уравнений Навье-Стокса, явная разностная схема, визуализация газодинамических параметров.

VISUALIZATION OF CALCULATED GAS DYNAMIC PARAMETERS IN CYLINDRICAL COORDINATES

Kononov S.N.
Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region
kononovsn@susu.ru

The paper presents the task of visualizing the results of numerical calculations of gas dynamic parameters. Calculations are carried out in cylindrical coordinates for a non-stationary mode when organizing air purging from above. Calculated values of temperature, density, and velocity vectors in a cylindrical grid are visualized by current lines, isosurfaces, and pressure gradients.

Key words: complete system of Navier-Stokes equations, explicit difference scheme, visualization of gas dynamic parameters.

В работах [1, 2] предложена полная система уравнений Навье-Стокса (ПСУНС) в цилиндрических координатах для сжимаемого вязкого теплопроводного газа в поле силы тяжести и с учётом действия силы Кориолиса. В [3] представлено решение этой задачи в численном виде для известного точного решения системы. Построенная численная схема с достаточной точностью повторяет точное решение, сохраняя устойчивость длительное время [4]. Дальнейшие расчёты проводятся для безразмерных значений плотности, температуры и составляющих вектора скорости в узлах цилиндрической сетки. Результаты расчётов необходимо визуализировать в произвольных временных срезах.

Оценить полученные результаты вычислений и проанализировать их физический смысл нужно с помощью изоповерхностей давления, градиентного представления давления и температуры в вертикальном разрезе модели, а так же линии тока газа. Поскольку система уравнений задана в безразмерном виде, то давление в узлах сетки в определённом масштабе можно получить перемножая безразмерное значение плотности и температуры в этом узле.

Программы и библиотеки визуализации в подавляющем большинстве строят изображения в декартовых координатах. Отображение газодинамических параметров в цилиндрических координатах получили путём преобразования координат исходной сетки в декартовы координаты по стандартным формулам перехода от цилиндрической к декартовой системе координат.

Исходные требования к отображению расчётных параметрах привели к выбору открытой кросс-платформенной программе визуализации ParaView на основе библиотеки VTK. Имеются встроенные инструменты для градиентного отображения параметров на разрезе объёма, построение изоповерхностей параметров и линий тока по векторному представлению скорости в узлах сетки. Важной особенностью является возможность построения любой произвольной сетки. Узлы сетки в цилиндрических координатах задаются как точки в прямоугольной системе отсчёта, координаты которых рассчитываются в зависимости от конфигурации по стандартным формулам перехода в самой программе. Так же в самой программе формируется вывод требуемых параметров по узлам сетки. Формат файла для визуализации позволяет использовать как скалярные, так и векторные данные. Составляющие скорости тоже должны быть пересчитаны из цилиндрической в прямоугольную систему координат. Векторные данные позволяют построить в ParaView линии тока воздуха, обладающие хорошей наглядностью при демонстрации возникающих восходящих закрученных потоков. Радиальная, окружная и вертикальная составляющие скорости без преобразований так же характеризуют некоторые процессы, к примеру, возникновение закрутки.

Для всестороннего исследования течений в газе при организации стока вверх из программы выгружаются рассчитанные скалярные величины давления, температуры, плотности и три составляющие скорости, так же для построений линии тока формируется файл с векторным представлением скорости в формате VTK. Дальнейшая визуализация осуществляется в ParaView.

Полученные изоповерхности и градиентное представление давления при организации стока вверх в трубу диаметром 0.1 от диаметра модели показывают результаты, схожие с экспериментальным поведением газа.

Использованные источники:

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков Екатеринбург: УрГУПС. 2020.
2. Баутин С.П., Обухов А.Г. Численное моделирование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа. Екатеринбург: УрГУПС. 2020.
3. 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.
4. Баутин С.П. Численное решение задачи газовой динамики, заданной полной системой уравнений Навье-Стокса. / С.П. Баутин, С.Н. Кононов, Э.С. Левунина // Сборник трудов XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ПРИДОННЫХ ЧАСТЯХ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА

Крутова И.Ю.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.
IYKrutova@mephi.ru

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.

Ключевые слова: Восходящий закрученный поток, сила Кориолиса, системы уравнений газовой динамики, задачи Коши.

ANALYTICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF FLOWS IN THE BOTTOM PARTS OF ASCREAMING SWIRLING FLOW WITH CONSIDERING THE ACTION OF GRAVITY AND CORIOLIS

Krutova I.Yu.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk region
IYKrutova@mephi.ru

The report deals with issues related to the study of natural ascending swirling currents, 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, the existence and uniqueness of the solution of specific characteristic Cauchy problems of the standard form, which model non-one-dimensional flows with a sink, an inflow, and near a heating cylinder, are substantiated.

Key words: Ascending swirling flow, Coriolis force, systems of gas dynamics equations, Cauchy problems.

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., Опрышко О.В. Расчет кинетической энергии течений в придонной части торнадо и тропического циклона: Препринт. – Снежинск: издательство СФТИ НИЯУ МИФИ, 2018. – 45 с.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ ГАЗА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СТОКА ВВЕРХ

Левунина Э.С.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
eslevunina@po-mayak.ru

В работе описываются результаты нестационарного счёта газодинамической задачи продува вверх. Рассматривается визуализация начальных течений газа и проверяется их адекватность физическим процессам, протекавшим в эксперименте продува.

Ключевые слова: полная система уравнений Навье-Стокса, явная разностная схема, визуализация газодинамических параметров

NUMERICAL CALCULATION OF CHANGES IN GAS PRESSURE AND DENSITY DURING THE ORGANIZATION OF UPFLOW

Levunia E. S.
Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region
eslevunina@po-mayak.ru

The paper describes the results of a non-stationary account of the gas dynamic problem of blowing up. The visualization of the initial gas flows is considered and their adequacy to the physical processes that took place in the purge experiment is checked.

Keywords: complete system of Navier-Stokes equations, explicit difference scheme, visualization of gas dynamic parameters

В работе рассмотрены результаты счёта методом конечных разностей потоков газа для предложенной в [2, 3] обезразмеренной полной системы уравнений Навье-Стокса в цилиндрических координатах. Предложенная модель учитывает действие силы Кориолиса и поля силы тяжести, сжимаемость, вязкость и теплопроводность газа при возникновении восходящего закрученного потока (ВЗП).

Представленные в [2] уравнения в частных производных были проверены на известном точном решении состояния покоя численными методами. Была выбрана явная схема представления уравнений с целью дальнейшего ускорения счёта путём распараллеливания вычислений. Полученная схема после 10^5 шагов показала совпадение параметров в состоянии покоя с точностью не хуже 10^{-10} [1,5].

Дальнейшая оценка адекватности расчётной схемы проверяется при продуве вверх через трубу диаметром 0,1 от диаметра модели. Это соответствует эксперименту, предложенному в [2]. Изменение газодинамических параметров в начале эксперимента и при выходе в стационарный режим служит критерием оценки адекватности модели.

Оценка адекватности расчётной схемы в нестационарном режиме наиболее важна в начале движения. Из физических соображений должно получаться постепенное разрежение газа в области под стоком. Появляются потоки воздуха по направлению от наружной стенки к оси модели. Воздействие силы Кориолиса приводят к появлению закрутки потоков и, в установившемся состоянии, к возникновению ВЗП. В начале движения необходимо контролировать давление в области под стоком, появление радиальной и вслед за ней окружной составляющей скорости движения.

Визуализация результатов проводилась в пакете ParaView. После определённого количества итераций безразмерные плотность и температура с привязкой к цилиндрическим координатам выгружались в файл .vtk со структурированной сеткой, полученной из

цилиндрической системы координат стандартными преобразованиями. Произведение этих параметров имеет физический смысл давления, поскольку рассматривалась обезразмеренная система. Вертикальным сечением по диаметру получали градиентное представление давления в области под стоком воздуха. В этой же области строились изоповерхности давления в разные моменты времени. Наблюдаемые результаты расчётов повторяют физические процессы, происходящие в эксперименте.

Радиальная и окружная составляющие скорости движения газа в том же формате сохранялись в свои файлы. Отображаемые в сечениях на разной высоте составляющие скорости соответствовали физическому смыслу. В верхних слоях, под стоком, уже в первые моменты времени возникают радиальные течения газа в сторону от внешней границы модели по направлению к оси. Появляется и окружная составляющая скорости, с течением времени она увеличивается.

Визуализация линий тока в ParaView наглядно передаёт особенности движения в ВЗП. Однако, необходимо учитывать, что в первые моменты времени окружная составляющая скорости значительно меньше радиальной, закрутка на линиях тока практически не видна. Появление окружной составляющей в начале движения газа лучше отслеживается по её скалярным значениям на горизонтальных сечениях модели для различных высот.

Полученные результаты показывают устойчивость начального движения воздуха при организации стока вверх и повторяют физический смысл происходящих в эксперименте процессов. Более полное представление о результатах счёта даст вывод составляющих скорости в векторной форме. Пакет визуализации позволяет строить линии тока, на которых можно проследить направление возникающих потоков и оценить влияние силы Кориолиса.

Использованные источники:

1. Баутин С.П. Адаптация для кластера расчета по явной схеме одной газодинамической задачи в цилиндрических координатах / С.П. Баутин, С.Н. Кононов, Э.С. Левунина // Сборник трудов IX международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». Новосибирск: ИГИЛ СО РАН, 2020.
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. Баутин С.П. Численное решение задачи газовой динамики, заданной полной системой уравнений Навье-Стокса. / С.П. Баутин, С.Н. Кононов, Э.С. Левунина // Сборник трудов XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019.

ПРОГРАММА ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЛАБОРАТОРИЯ ИНЖЕНЕРА-АТОМЩИКА»

Логутов К.Д.
ГБОУДО «Дворец творчества детей и молодежи имени А.П.Гайдара», г. Москва
klogutov@mail.ru

Данный курс является одной из ступеней в профориентации детей. Он позволяет учащимся погрузиться в детали новых для них профессий, востребованных для атомной отрасли.

Ключевые слова: предпрофессиональное образование, дополнительное образование, атомная отрасль.

PRE-PROFESSIONAL EDUCATION PROGRAM "LAB OF NUCLEAR ENGINEER"

Logutov K.D.
SBEIAE “The palace of creativity of children and youth of A.P. Gaidar”, Moscow

This is one of the steps in the career guidance of children. It allows students to immerse themselves in the details of new professions for them, in demand for the nuclear industry.

Key words: pre-professional education, additional education, nuclear industry.

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. Учебный курс включает следующие модули и разделы, представленные в таблице 1 (программа рассчитана на 72 академического часа).

Таблица 1 – Структура курса

№ п/п	Модуль	Раздел
1	Физика атома и атомного ядра	Строение атома и атомного ядра
		Ядерный реактор
		Дозиметрический контроль (часть 1)
		Лазерное излучение
2	Основы радиохимии и радиационной химии	Добыча и обогащение урана
		Методы разделения и производства радионуклидов
		Отработавшее ядерное топливо и радиоактивные отходы
		Применение методов радиационной химии
3	Основы радиоэкологии	Понятие о радиоэкологии
		Дозиметрический контроль (часть 2)
		Влияние радиоактивного фона на живые организмы и экосистемы
		Аварии на ядерных объектах

4	История атомной отрасли	Создание советской атомной бомбы
		Мирное использование атома
		Радиационная безопасность
5	Проектная деятельность	Подготовка проектов
		Защита проектов

При проведении занятий используются приемы и методы дифференцированного обучения, теории решения изобретательских задач, развития критического мышления, педагогического дизайна, организации проектной деятельности детей.

В ходе реализации программы проводятся следующие виды исследований и экспериментов:

1) Исследование зависимости радиационного фона от проветривания помещения, температуры и влажности;
2) Исследование зависимости радиационного фона к высоте (этажам);
3) Исследование распределения уровня радона по высоте (этажам);
4) Сравнительные эксперименты по калийсодержащим удобрениям различных концентраций K_2O;
5) Исследование современных технологий в применении методов радиационной химии;
6) Исследование исторического и современного вклада атомных городов для атомной отрасли;
7) Исследование атомных технологий в повседневной жизни человека.

Также помимо решения стандартных задач по ядерной физике, ребятам предлагается решить сложные, но интересные кейсы с использованием компьютеров и дозиметров (табл. 2).

Таблица 2 – Описание кейсов

Название кейса	**Описание**
Развитие атомной отрасли в стране А	Ученики становятся министрами энергетики и им необходимо развить атомную энергетику. Ребята предлагают свои варианты развития возведения АЭС, исходя из начальных данных. В заключении выбирается оптимальный вариант развития.
Атомный морской бой	Ученики становятся главными дозиметристами порта, их задача – определить «радиоактивный» предмет в коробках и занести в специальный рабочий лист.

Программа «Лаборатория инженера-атомщика» позволит детям заинтересоваться атомной энергетикой и получить крепкий фундамент для построения собственного вектора развития в одной из самых сложных и перспективных сфер науки.

Использованные источники:

1. Волошин Н. П. К истории отечественного атомного проекта: курс лекций для слушателей учеб. заведений «Росатома», студ. физ. специальностей вузов (14 лекций, 34 академических часа) / [отв. ред. Т. Г. Новикова]. – Ред. 2-я, испр. – М. : ИздАТ, 2009. – 315 с.
2. Жерин И.И., Амелина Г.Н. Основы радиохимии, методы выделения и разделения радиоактивных элементов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2009. – 196 с.
3. Карелина О.А., Логутов К.Д., Садовский А.А. Многоуровневая система критериев для оценки различных видов энергетики региона // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – 12-2 (732). – С. 30-35
4. Логутов К.Д. Возможности развития «зеленой энергетики» на примере Челябинской области // Материалы статей XIV Международной научно-практической конференции

«Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения». – Пенза. 2019. С. 59-61.
5. Логутов К.Д., Негреев А.И., Садовский А.А. Совершенствование системы безопасности ядерных энергетических реакторов // Материалы статей XXVII Региональной научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» 23-25 сентября 2019 г.: Новосибирск, 2019
6. Методические материалы Инженерных классов [Электронный ресурс] : URL: https://profil.mos.ru/inj.html (Дата обращения: 10.11.2022)
7. Обращение с радиоактивными отходами: учеб. пособие/ А. В. Обручиков, Е. А. Тюпина – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2014. – 188 с.
8. Радиоэкология: пособие / Т. А. Макаревич. – Минск : БГУ, 2013. – 136 с.
9. Сельскохозяйственная радиология: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. / А. Д. Фокин, А. А. Лурье, С. П. Торшин. - СПб.: Лань, 2011. - 416 с.
10. Физика. 9 класс: учеб. для общеобразоват. организаций / О.Ф.Кабардин – 4-е изд. – М.: Просвещение, 2017. – 176 с.

АНАЛИЗ БУМАЖНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕЧАТИ ЧЕРТЕЖЕЙ И КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Машкин А.Н.[1,2]
[1] *ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт»*
[2] *ФГАОУ ВО «Технологический институт», г. Лесной*
Mashkin2698@mail.ru

Статья посвящена анализу выбора бумажных носителей для печати чертежей и конструкторской документации машиностроительного предприятия. Выбор носителей представленный в статье, основан на свойствах бумаги. Представленные виды могут быть использованы при печати в зависимости от наиболее подходящих характеристик для печатающего устройства.

Ключевые слова: Бумага, анализ свойств и материалов бумаги, черчение, печать чертежей, светопроводимость.

ANALYSIS OF PAPER CARRIERS FOR PRINTING DRAWINGS AND DESIGN DOCUMENTATION

Mashkin A.N.[1,2]
[1] Snezhinsky Institute of Physics and Technology
[2] FGAOU VO "Technological Institute", Lesnoy
Mashkin2698@mail.ru

The article is devoted to the analysis of the choice of paper media for printing drawings and design documentation of a machine-building enterprise. The choice of media presented in the article is based on the properties of the paper. The presented types can be used for printing, depending on the most suitable characteristics for the printing device.

Key words: Paper, analysis of properties and materials of paper, drawing, printing of drawings, light transmission.

Оформление и содержание чертежей изменялись с развитием общества. Неизменным длительное время оставался лишь способ их выполнения. Не одну сотню лет чертежи выполнялись вручную – на бумаге. Бумага являлась основным носителем информации.

Без специальной бумаги не обойтись, если нужно выполнить графические работы: чертежи, планы, схемы, профили. Чтобы изображение получилось качественным, недостаточно владеть навыками черчения или новым плоттером. Выбор бумаги для чертежей также важен для получения оптимального результата.

Виды и свойства бумаги для черчения.

Сегодня для черчения используется несколько видов бумаги. Какой из них выбрать, зависит от назначения чертежа и средств, которыми наносят графику. В большинстве случаев выбор бумаги для чертежей определяет ГОСТ 597-73.

Качество чертежа и время, необходимое для его воспроизведения, во многом зависят от качества бумаги. Бумага вырабатывается из целлюлозных волокон. В зависимости от способа изготовления, различают бумагу ручного отлива и бумагу машинного отлива. Лучшие сорта бумаг вырабатываются ручным способом. В этом случае во время полива волокна располагаются хаотично, и структура бумаги не имеет какого-либо выделенного направления. Поэтому линии чертежа наносятся на бумагу одинаково хорошо в любых направлениях. Это наиболее редкие и дорогие сорта бумаги

При машинном отливе структура бумаги приобретает определенную направленность и при черчении тушью линии наносятся хуже или лучше, в зависимости от направления. Продается обычно именно такая бумага.

Для придания бумаге определенных физических свойств в бумажную массу добавляют наполнители (химические, минеральные и проклеивающие вещества).

Чертежная бумага должна быть хорошо проклеена и долгое время сохранять белизну. Для проверки качества бумаги, ее подвергают испытанию. Если бумага лохматится при трении резинкой, это значит, что она плохо проклеена. Хорошая бумага не ломается, если перегибать ее несколько раз в одном и том же месте. Плохо проклеенная непрочная бумага не пригодна для тонких графических работ.

Чертежная бумага не должна желтеть под действием света.

Выбор бумаги определяется характером выполняемой чертежной работы. Для выполнения топографической карты требуется белая чертежная бумага высокого качества, а для составления нивелирных профилей требуется так называемая профильная или миллиметровая бумага. Для черчения применяют сорта бумаги под названием ватман.

Первый вид бумаги, который широко используется для чертежей, это миллиметровка. Миллиметровка - это масштабно-координатная бумага, размеченная машинным способом на квадраты со стороной 1, 10, 50 и 100 мм. Используется для эскизов, а также нанесения профилей дорожного покрытия, планов. (Рис. 1).

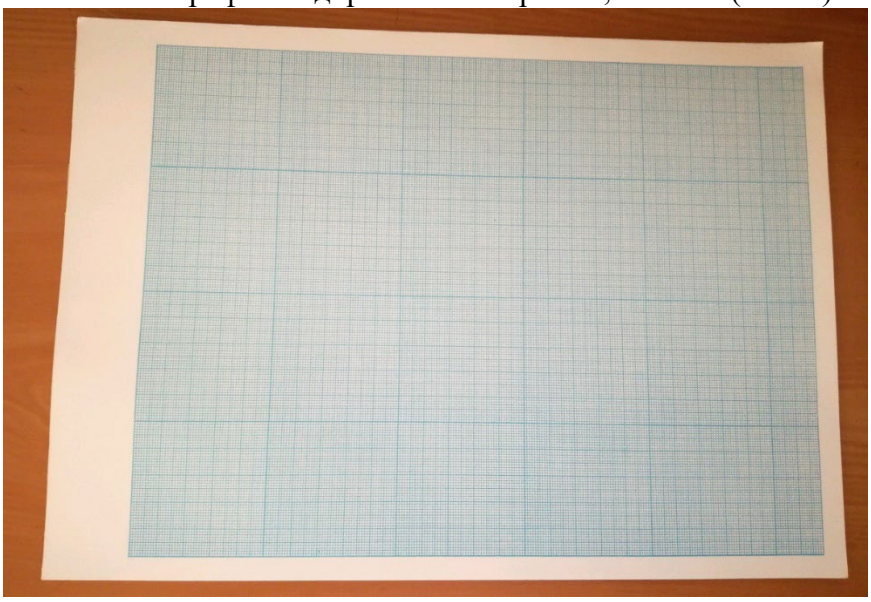


Рисунок 1. Миллиметровка.

Следующий вид бумаги – ватманы. Они имеют высокую плотность и качество. На них наносят большинство графики, как учебной, так и производственной. Они подходят и для работы карандашом или ручкой, и для печати. В последнем случае может быть использована и бумага для плоттера, которая имеет меньшую плотность и прочность.

Бумага бывает шероховатой (без покрытия) и матовой. Лучший выбор бумаги для чертежей – это матовый ватман. Такое изделие отлично передает цвета и хорошо впитывает чернила, не давая им растекаться. При печати на плоттере допускается использование ватмана или специальной бумаги без покрытия – для внутреннего пользования, учебных, пробных чертежей. (Рис. 2).

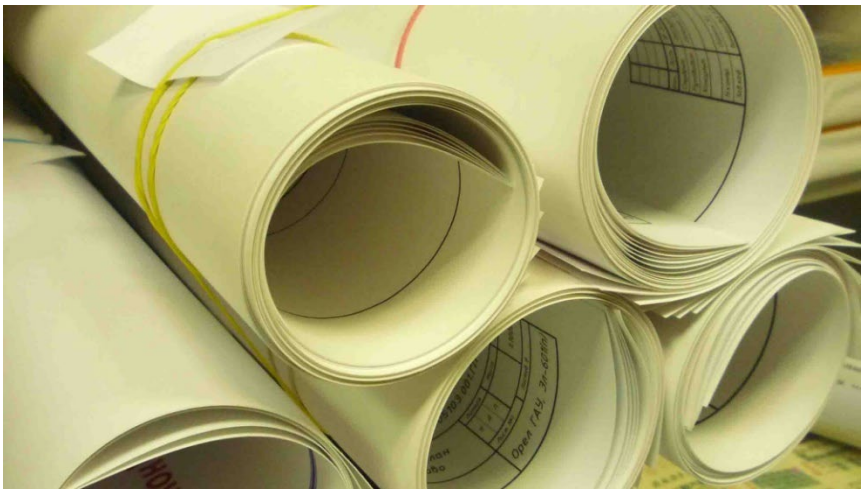


Рисунок 2. Ватман.

Последний вид бумаги, который часто используется при печати чертежей и документов – это калька. Калька - полупрозрачная бумага для копирования вручную, а также некоторых документов топографов, геодезистов. Бывает матовой и глянцевой. Первый вариант плотнее и используется под карандаш, второй – тоньше и применяется под тушь.

Калька и миллиметровка – стандартные изделия, а вот предложение ватманов и плоттерной бумаги разнообразно. Это основные виды бумаги для черчения, поэтому на их подбор нужно обратить особое внимание. (Рис. 3).

Рисунок 3. Калька.

Оптические свойства бумаги.

К оптическим свойствам бумаги относятся: белизна, светопроницаемость, прозрачность, глянец.

От оптических свойств бумаги зависят: контрастность изображения, точность цветопередачи при многокрасочной печати, качество и внешний вид печатной продукции в целом.

Взаимодействие бумаги со светом не отличается от взаимодействия света с любым другим веществом. Прохождение света через бумажный лист иллюстрирует рис. 4.

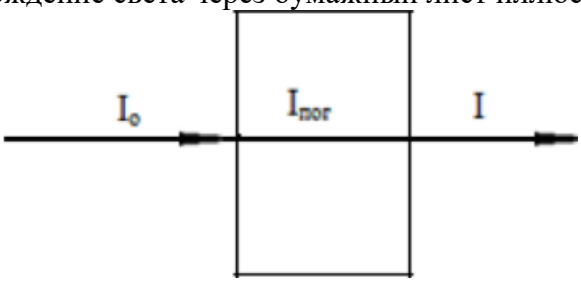


Рисунок 4. Прохождение света через бумажный лист.

Падающий на поверхность бумаги световой поток интенсивностью I (0) частично отражается (I отр.), частично поглощается бумажным листом (I пог.) и частично проходит сквозь бумажный лист (I). Из закона сохранения энергии следует: I(0) = Iотр. + Iпог. + I.

Разделив обе части этого выражения на I(0), получаем:

$$\frac{\text{I отр}}{\text{I}(0)} + \frac{\text{I пог}}{\text{I}(0)} + \frac{\text{I}}{\text{I}(0)} = 1$$

Где I отр. - коэффициент отражения характеризующий светорассеяние бумаги - отношение количества, отраженного бумагой светового потока к падающему на нее световому потоку;

I пог. - коэффициент поглощения (характеризующий светопоглощение бумаги - отношение количества, поглощенного бумагой светового потока к падающему на нее световому потоку;

I - коэффициент светопропускания, или пропускания, характеризующий светопроницаемость бумаги - отношение количества, пропущенного бумагой светового потока к падающему на нее световому потоку. Таким образом, I отр. + I пог. + I = 1. Если же коэффициенты I отр., I пог. и I выражены в процентах, в этом случае I отр. + I пог. + I = 100%

Для печатной бумаги названные коэффициенты имеют следующие значения:

I отр. = 0,60-0,87 (60-87 % падающего светового потока отражается от поверхности бумаги);

I пог. = 0,1-0,3 (10-30 % падающего светового потока бумага поглощает);

I = 0,01-0,10 (1-10 % падающего светового потока бумага пропускает).

Белизна - это свойство бумаги отражать большую часть падающего на нее света рассеянно и равномерно по всей видимой области спектра. Возможны три случая отражения света от поверхности (рис. 5).

Бумага рассеивает отраженный свет в разных направлениях в отличие от зеркального отражения. Количественной характеристикой белизны бумаги является коэффициент отражения.

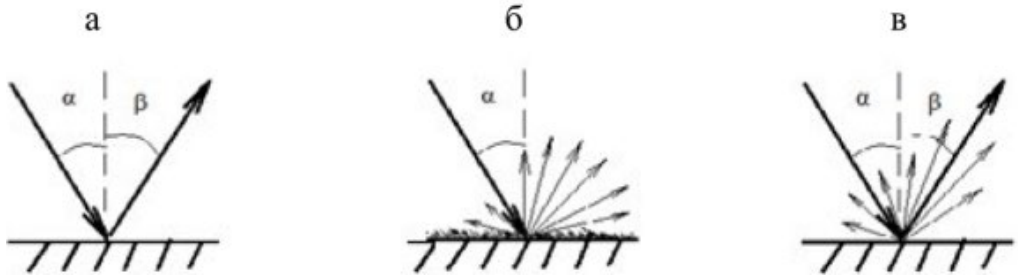


Рисунок 5. Отражение света: а - зеркальное; б - рассеянное (от матовой бумаги); в - частично зеркальное (от глянцевой бумаги).

Белизна зависит от вида печатной бумаги и соответственно ее волокнистого состава. К примеру, рисовая бумага и бумага из конопляной массы обладает большей белизной, чем бумага из древесной целлюлозы, и зачастую дополнительного отбеливания не требует. Для увеличения белизны в дорогие сорта бумаги при их изготовлении вводят оптические отбеливатели (люминофоры), которые преобразуют свет из ультрафиолетового (УФ) диапазона в видимую часть спектра, а также синие или фиолетовые красители. Последний способ увеличения белизны бумаги называется подцветкой. Как правило, для высококачественной иллюстративной печати применяют бумагу с высокой белизной. Существенное повышение белизны достигается мелованием бумаги.

На белизну бумаги влияют значения коэффициента отражения наполнителей, которые приведены в таблице 6.4. Лучшим наполнителем в этом отношении является диоксид титана.

Таблица 1. Значения коэффициента отражения наполнителей.

Наполнитель	к
Тальк	0,80-0,88
Каолин	0,80-0,90
Цинковые белила	0,97-0,98
ТЮ2	0,98-0,99

Сравнительные значения коэффициента (белизны) разных видов печатной бумаги приведены в таблице 2.

Немаловажное влияние на белизну изготовляемой бумаги оказывает качество используемой производственной воды, а именно: ее окраска, определяемая наличием тех или иных примесей. Все технологические факторы, способствующие повышению светопроницаемости бумаги (высокая степень помола волокнистой массы, значительное уплотнение бумаги в прессах и при каландрировании) одновременно снижают белизну бумажного полотна. К этому же ведет и пересушивание бумаги, которое сопровождается ее пожелтением.

Таблица 2. Значения коэффициента отражения разных видов печатной бумаги

Вид бумаги	к
Газетная	0,65
Мелованная	
- без отбеливателя	>0,76
- с отбеливателем	>0,84

Светопроницаемость и прозрачность.

Светопроницаемость - это способность материала пропускать падающий на него свет. Светопроницаемость является недостатком печатной бумаги, т.к. делает видимым изображение, напечатанное на оборотной стороне листа. Это особенно важно для тонкой бумаги, которую труднее изготовить непрозрачной. Для бумаги характерна светопроницаемость с рассеянием света, что обусловлено многократным преломлением света на микронеоднородностях ее поверхности.

Количественно светопроницаемость оценивается по коэффициенту пропускания К, который определяется с помощью спектрофотометров в проходящем свете (рис. 6).

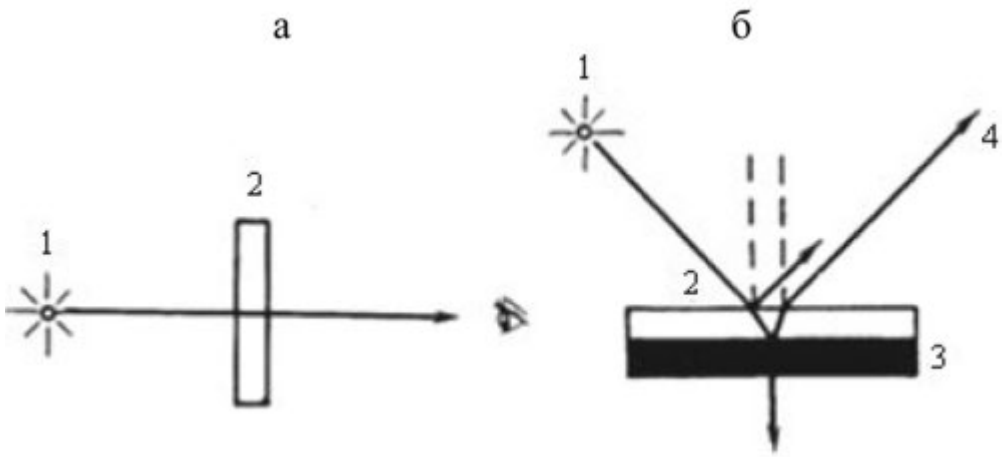


Рисунок 6. Схема определения светопроницаемости (а) и прозрачности (б) бумаги.

1 – источник света; 2 - бумага; 3 - подложка; 4 - луч, отраженный от подложки

От светопроницаемости материала следует отличать его прозрачность. Прозрачность - это способность материала пропускать свет без рассеяния (без изменения направления света). Прозрачность бумаги оценивается степенью видимости в отраженном свете через бумагу знаков и рисунков, нанесенных на подложку. Несмотря на различие методов определения светопроницаемости и прозрачности бумаги, наиболее светопроницаемая бумага будет и наиболее прозрачной.

Светопроницаемость бумаги зависит от вида полуфабрикатов, использованных при ее изготовлении, степени размола бумажной массы, наличия в волокнистой композиции наполнителей и окрашивающих веществ, а также от характера поверхности бумаги. Растительные волокна непрозрачны, так как содержат лигнин, смолу и другие вещества, придающие непрозрачность и имеющие оттенки от белого до темно-коричневого. Наименее прозрачными являются волокна древесной массы, содержащие почти полностью все компоненты исходной древесины. Поэтому введение древесной массы в волокнистую композицию способствует снижению показателей светопроницаемости и прозрачности бумаги.

Значение коэффициента (К) также уменьшается

- с увеличением толщины бумаги,
- за счет введения наполнителей,
- за счет поверхностного мелования.

К увеличению значения коэффициента (К) бумаги приводят

- жирный помол бумажной массы,
- проклейка,
- каландрирование.

Наполнители снижают светопроницаемость бумаги за счет преломления света на их частицах, что приводит к рассеянию падающего на бумагу света. Чем больше разница между показателем преломления (nD) минерального наполнителя и целлюлозных волокон, из которых изготовлена бумага, тем больше снижение светопроницаемости бумаги и тем больше ее белизна. Значения различных наполнителей приведены в таблице 3. Из нее следует, что наименьшую светопроницаемость бумаге придает диоксид титана при использовании его в качестве минерального наполнителя или в покровном слое бумаги.

Непрозрачность бумаги (%) определяется вместе с белизной при помощи лейкометра как коэффициент отражения бумажного образца на черном фоне. Это особенно важный показатель при двухсторонней печати. Для печатной бумаги значение непрозрачности должно составлять не менее 87-92 %, иначе изображение или текст будут просвечиваться на другую сторону листа. Сравнить величину

непрозрачности различных видов бумаги можно и без приборов. Достаточно положить их на одинаковый рисунок и оценить степень его просвечивания.

Таблица 3. Сравнительные значения nD целлюлозы и различных наполнителей

Вещество	nD
Целлюлоза	1,53
Тальк	1,55
Каолин	1,56
Мел	1,56
BaSC>4	1,64
ZnO	2,01
ТЮ2	2,62

На практике за меру непрозрачности материала принято значение так называемой оптической плотности (D):

D = lg (IJI) = 1 g(l/z).

Как видно, D - показатель, обратный коэффициенту пропускания (К). Физический смысл D - ослабление интенсивности светового потока при прохождении через материал. Величину D печатной бумаги измеряют с помощью денситометров и спектрофотометров.

Чем больше разница между значениями D запечатанной и чистой бумаги (чем больше разница между белизной бумаги и чернотой запечатанных участков), т. е., чем больше контраст между печатным элементом и фоном, тем лучше воспринимается изображение, напечатанное на бумаге.

Цветной оттенок бумаги создает различную контрастность при восприятии разных цветов. Это нарушает цветопередачу при воспроизведении цветных оригиналов. Поэтому печатная бумага не должна иметь заметного цветного оттенка.

Глянец.

Глянец (лоск, блеск) - это проявления частично зеркального отражения, когда на фоне рассеянного отражения наблюдается его максимум в направлении угла отражения (D) равного углу падения. Так возникает блик, т.е. оптический эффект, который используется при печатании обложек, этикеток, рекламных и иллюстрированных изданий.

Для определения глянца бумаги измеряют интенсивность света, отраженного от ее поверхности в разных направлениях. Степень глянца выражается разностью (в процентах) между количеством света, отраженного зеркально и рассеянно. А именно: глянец, как физическую величину определяют с помощью фотометров по отношению интенсивности светового потока, зеркально отражённого под углом 75° от поверхности материала к интенсивности светового потока, отражённого от поверхности чёрного полированного стекла, которое должно отражать 26 % падающего на него под тем же углом света. Коэффициент отражения в 26 % определяется свойствами волны, отражённой от идеальной полированной поверхности. Применение чёрного стекла обусловлено тем, чтобы свести к нулю объёмное отражение самой стеклянной пластины. Отражение чёрного полированного стекла под углом в 75° является по определению 100 % блеском. В этой связи формула для определения степени глянца (λ75) выглядит следующим образом:

$$\lambda(75) = \frac{I\,(75)}{I(\lambda)} + \frac{I\,(75)}{0.26\,I(0)} * 100$$

где I (75) - интенсивность светового потока, отражённого от материала под углом в 75°; I (λ) - интенсивность светового потока, отражённого под тем же углом от чёрного полированного стекла.

Глянец достигается обработкой бумаги в суперкаландре, особенно если на ее поверхности нанесен покровный пигментный слой (проведено мелование). Степень глянца матовой бумаги меньше 30 %, а глазированной, или лощеной (т.е. пропущенной через суперкаландр) 75-85 %. Глянец - очень важная характеристика в практике полиграфии. Он привлекает внимание к полиграфической продукции в тех случаях, когда речь идёт о рекламе или об упаковке. Блики же на печатной продукции затрудняют чтение текстов. Для воспроизведения текста применяется бумага с минимальным глянцем.

Общие требования к печатной бумаге.

Все требования к бумаге для печати можно разделить на две группы:

1) обеспечение стабильности печати;

2) обеспечение качества (оптических параметров) печатного оттиска.

Каждый способ печати предъявляет к используемой бумаге определенные требования. Однако есть ряд требований, общих для всех видов печатной бумаги. К ним относятся:

1) достаточная белизна;

2) непрозрачность;

3) гладкость (отсутствие микронеровности на поверхности);

4) впитывающая способность (пористость и капиллярность);

5) механическая прочность и пластичность;

6) прочность поверхности к истиранию и выщипыванию;

7) отсутствие сорности (допустимая площадь соринок не более 5 мм2);

8) прямоугольность и плоскостность (отсутствие волнистости, складок, морщин и прогибов);

9) отсутствие пятен, механических повреждений и посторонних включений;

10) чистота и ровность обрезов листа;

11) оптимальная влажность;

12) светостойкость;

13) химическая инертность и безвредность;

14) минимальное абразивное воздействие на печатную форму;

15) отсутствие на поверхности статического электричества.

Первые восемь показателей относятся к основным печатным свойствам бумаги, определяющим качество оттиска.

В печатных процессах от свойств бумаги зависят

- переход печатной краски с печатной формы на бумагу (или тонера в электрофотографии и других бесконтактных способах печати);
- ввод и прохождение бумаги через печатную машину;
- закрепление печатной краски на бумаге (высыхание печатных оттисков);
- после печатные (брошюровочно-переплетные и отделочные) операции.

Переход печатной краски на бумагу и закрепление на ней при прочих равных условиях (режиме работы печатной машины, свойств печатной краски и т. п.) зависят от сорбционной способности бумаги по отношению к компонентам краски. Прохождение бумаги через печатную машину определяет принципиальную возможность выполнения процесса печати в целом и получения оттисков необходимого качества. Наиболее распространенный дефект, возникающий при прохождении бумаги

через печатную машину, - возникновение морщин. Образованию морщин в наименьшей степени подвержена жесткая бумага с низкой растяжимостью.

Причиной многих производственных трудностей и неполадок, в том числе остановки печатной машины для регулирования режима работы является неоднородность бумаги от партии к партии и от листа к листу по толщине, гладкости, впитывающей способности по отношению к печатной краске, стойкости поверхности к выщипыванию. Необходимым условием обеспечения потребительской пригодности печатной продукции является оптическая однородность бумаги.

В Российской Федерации требования к бумаге, предназначенной для разных способов печати с использованием печатной формы, регламентируются следующими стандартами:

- ГОСТ 9095-89 «Бумага для печати типографская»;
- ГОСТ 25089-81 «Бумага типографская для многотомных изданий»;
- ГОСТ 9094-89 «Бумага для печати офсетная»;
- ГОСТ 9168-80 «Бумага для глубокой печати»;
- ГОСТ 21444-75 «Бумага мелованная»;
- ГОСТ 1339-79 «Бумага картографическая»;
- ГОСТ 6445-74 «Бумага газетная».
- ГОСТ 6742-79 «Бумага форзацная»;
- ГОСТ 20283-89 «Бумага обложечная»;

Использованные источники:

1. Геометрические свойства бумаги. [Электронный ресурс]. URL: https://vuzlit.com/154458/geometricheskie_svoystva_bumagi
2. Особенности структуры и свойства бумаги [Электронный ресурс]. URL: https://www.advesti.ru/publish/poligraf/paper
3. Свойства бумаги: теория и практика. [Электронный ресурс]. URL:
4. https://compuart.ru/article/14526

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ КЛАССИФИКАЦИЙ И СВОЙСТВ БУМАГИ ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ПЕЧАТИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Машкин А.Н.[1,2]
[1] *ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.*
[2] ФГАОУ ВО «*Технологический институт», г. Лесной, Свердловская обл.*
Mashkin2698@mail.ru

Статья посвящена анализу основных классификаций и свойств бумаги влияющих на качество печати конструкторской документации. Выбор бумажных носителей в статье основан на основных свойствах бумажных носителей. Представленные свойства могут быть учтены при печати конструкторской документации.

Ключевые слова: бумага, анализ свойств и материалов бумаги, расчет физических свойств бумаги.

ANALYSIS OF THE MAIN CLASSIFICATIONS AND PROPERTIES OF PAPER AFFECTING THE QUALITY OF PRINTING OF ENGINEERING DOCUMENTATION

Mashkin A.N.[1,2]
[1] Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region.
[2] FGAOU VO "Technological Institute", Lesnoy, Sverdlovsk region.
Mashkin2698@mail.ru

The article is devoted to the analysis of the main classifications and properties of paper affecting the quality of printing design documentation. The choice of paper media in the article is based on the basic properties of paper media. The presented properties can be taken into account when printing design documentation.

Key words: paper, analysis of properties and materials of paper, calculation of physical properties of paper.

Ни для кого не секрет, что в современной полиграфии огромное влияние на качество и рентабельность оказывает бумага. От правильного подбора бумаги напрямую зависят качество полиграфической продукции и ее соответствие условиям предполагаемого использования.

Прежде всего бумага — это многокомпонентная система, состоящая из специально обработанных растительных волокон, тесно переплетенных между собой и связанных химическими силами сцепления различных видов. Помимо волокнистых компонентов, формирующих структуру бумаги и ее основные свойства, в состав бумаги могут вводиться минеральные наполнители (проклеивающие вещества, красители и др. специальные добавки).

Бумага различается по толщине или по массе одного квадратного метра (г/м2). По принятой классификации масса 1 м2 печатной бумаги может составлять от 40 до 250 г. Более 250 г/м2 — это уже картон.

Один из важнейших технических показателей бумаги, от которого зависят многие основные свойства — прочность, упругость, пластичность, светостойкость и др., — это композиция бумаги. Отечественные бумаги по композиции подразделяются на группы по номерам: № 1, № 2, № 3.

Бумага № 1 — это чисто целлюлозная бумага. Сделанные, как правило, только из целлюлозных волокон, чисто целлюлозные бумаги обычно имеют высокую белизну, повышенную прочность, почти не подвержены старению при хранении. Такие бумаги используются для изготовления высокохудожественной продукции, словарей, энциклопедий, официальных справочных изданий.

Бумага № 2 содержит до 50% древесной массы, которая придает бумаге ряд полезных качеств — улучшаются печатные свойства, стабильность размеров при изменении климатических условий, снижается масса листа и т.д. В сравнении с № 1 бумага № 2 дешевле.

Бумага № 3 полностью состоит из древесной массы. Это дешевая бумага невысокого качества, используемая для изданий с небольшим сроком службы и применяемая только для типографской (высокой) печати.

Печатные свойства определяют ее поведение при прохождение ее через бумагопроводящую систему печатной машины, во время печати взаимодействие бумаги с печатной краской и процесс закрепления изображения и после нее операции фальцовки, брошюровки, подрезки, а также эксплуатационные характеристики готовой продукции. Все печатные свойства бумаги можно объединить в следующие группы:

1. Геометрические (гладкость, толщина и масса 1 м2, плотность и пористость);
2. Оптические (белизна, непрозрачность, лоск, или глянец);
3. Структурные — показатели однородности структуры (равномерность просвета, разносторонность);
4. Механические — прочностные и деформационные (прочность поверхности к выщипыванию, разрывная длина, или прочность на разрыв, прочность на излом, влагопрочность, мягкость и упругость при сжатии и т.д.);
5. Сорбционные (гидрофобность — стойкость к действию воды, впитывающая способность растворителей печатных красок).

Все эти показатели взаимосвязаны, и степень их влияния на оценку печатных свойств различна для разных способов печати.

Геометрические свойства бумаги:

Гладкость бумаги, микрорельеф ее поверхности определяет «разрешающую способность» бумаги — способность передавать без разрывов и искажений тончайшие красочные линии, точки и их комбинации. Это одно из важнейших печатных свойств бумаги. Чем выше гладкость бумаги, тем лучше контакт между ее поверхностью и печатной формой, тем меньшее давление нужно приложить при печатании и тем выше качество изображения. Гладкость бумаги определяется в секундах с помощью пневматических приборов.

Различные способы печати предъявляют к бумаге разные требования по гладкости. Так, каландрированная типографская бумага должна иметь гладкость от 100 до 250 с, а офсетная бумага той же степени отделки может иметь гладкость гораздо ниже — 80-150 с. Бумага для глубокой печати отличается повышенной гладкостью — от 300 до 700 с. Газетная бумага не может быть гладкой из-за пористости. Гладкость поверхности существенно улучшается путем нанесения любого покровного слоя (поверхностная проклейка, пигментирование, мелование).

Поверхностная проклейка — это нанесение на поверхность бумаги тонкого слоя проклеивающих веществ (масса покрытия — до 6 г/м2) для обеспечения высокой прочности поверхности бумаги, предохранения ее от выщипывания отдельных волокон липкими красками, а также для уменьшения деформации бумаги при увлажнении и обеспечения точного совпадения красок при многокрасочной печати. Особенно это важно для офсетной и литографской печати, когда бумага в процессе печати подвергается воздействию воды.

Пигментирование и мелование бумаги различаются только массой наносимого покрытия. Так, считается, что масса покровного слоя в пигментированных бумагах не

превышает 14 г/м2, а в мелованных бумагах достигает 40 г/м2. Меловой слой отличается высокой степенью белизны и гладкости. Высокая гладкость — одна из наиболее важных характеристик мелованных бумаг. Их гладкость достигает 1000 с и более, а высота рельефа не превышает 1 мкм. Показатель гладкости не только обеспечивает оптимальное взаимодействие бумаги и краски, но и улучшает оптические свойства поверхности, воспринимающей красочное изображение.

Важным свойством бумаги является пористость, от которой зависит ее впитывающая способность (способность воспринимать печатную краску) и которая вполне может служить характеристикой структуры бумаги. Бумага является пористо-капиллярным материалом, при этом различают макро и микропористость. Макропоры (или просто поры) — это пространства между волокнами, заполненные воздухом и влагой. Микропоры (капилляры) — мельчайшие пространства неопределенной формы, пронизывающие покровный слой мелованных бумаг, а также образующиеся между частичками наполнителя или между ними и стенками целлюлозных волокон у немелованных бумаг. Капилляры есть и внутри целлюлозных волокон.

Все немелованные, не слишком уплотненные бумаги (например, газетная) относятся к макропористым. Общий объем пор в таких бумагах достигает 60% и более, а средний радиус пор составляет около 0,16-0,18 мкм. Благодаря своей рыхлой структуре такие бумаги хорошо впитывают краску.

К микропористым (капиллярным) относятся мелованные бумаги. Они также хорошо впитывают краску, но уже под действием сил капиллярного давления. Здесь пористость составляет всего лишь 30%, а размер пор не превышает 0,03 мкм.

Остальные бумаги занимают промежуточное положение. Плотность печатных бумаг колеблется от 0,5 г/см3 — для рыхлых (пористых) и до 1,35 г/см3 — для высокоплотных капиллярных бумаг.

Свойство	Определение	Способ измерения
1	2	3
Гладкость	Гладкость бумаги определяет ее "разрешающую способность": способность передавать без разрывов и искажений тончайшие красочные линии, точки и их комбинации.	Гладкость бумаги измеряется в секундах с помощью пневматических приборов или с помощью профилограмм, дающих наглядное представление о характере поверхности бумаги.
Толщина	Толщина - это расстояние по вертикали между двумя параллельными поверхностями бумаги при заданном давлении на поверхность.	Определяется толщиномером или микрометром и выражается в мм или мкм. Для этого используется образец бумаги размером 100 х 100 мм. Измерения толщины производятся в пяти местах образца, затем рассчитывается среднее арифметическое значение - hср.

Масса квадр. метра (граммаж)	Масса квадратного метра бумаги характеризует ее толщину, так как чем толще бумага, тем она тяжелее (при условии равной плотности).	Определяется взвешиванием образца бумаги, размером 100 х 100 мм на специальных квадрантных весах.
Плотность	Плотность - масса 1 см3 бумаги. Она определяется отношением массы материала к его объему. d=, г/см^3	Для расчета плотности бумаги используются значения массы квадратного метра и толщины бумаги. m равна массе квадратного метра в граммах, а объем V (см3) равен произведению площади листа бумаги S (в см2) на среднюю толщину hср (в см).
Пористость	Пористость - это объем пор, содержащихся в 1 см3 бумаги.	Определяется расчетным способом: П= · (Vп/ Vб) х 100% , где Vп - объем пор Vб - объем бумаги

Таблица 1 - Геометрические свойства бумаги и их измерение.

Оптические свойства бумаги:

Особое значение придается оптическим свойствам бумаги — белизне, непрозрачности и лоску (глянцу).

Белизна — это способность бумаги отражать свет рассеянно и равномерно во всех направлениях. Поскольку четкость и удобочитаемость издания зависит от контрастности запечатанных и пробельных участков оттиска, желательно, чтобы бумага обладала высокой белизной.

Цветовая точность изображения, ее соответствие оригиналу возможны только при печати на действительно белой бумаге. Для повышения белизны в дорогие высококачественные бумаги добавляют так называемые оптические отбеливатели — люминофоры, а также синие и фиолетовые красители, устраняющие желтоватый оттенок, присущий целлюлозным волокнам. Этот прием называют подцветкой. Мелованные бумаги без оптического отбеливателя имеют белизну не менее 76%, а с оптическим отбеливателем — уже не менее 84%. Печатные бумаги с содержанием древесной массы должны иметь белизну не менее 72%, а вот газетная бумага может быть недостаточно белой, ее белизна составляет около б5%.

Еще одним важным (особенно при двухсторонней печати) свойством печатной бумаги является ее непрозрачность. Для повышения непрозрачности подбирают композицию волокнистых материалов, комбинируют степень их помола, вводят наполнители.

К оптическим свойствам бумаги относится также ее лоск, или глянец. Лоск является результатом отражения поверхностью бумаги падающего на нее света. Естественно, это тесно связано с гладкостью бумаги. Обычно с повышением гладкости увеличивается и лоск. Однако надо помнить, что гладкость определяется механическим

способом, а лоск является оптической характеристикой. Глянец глазированной бумаги может составлять 75-80%, а матовой — до 30%.

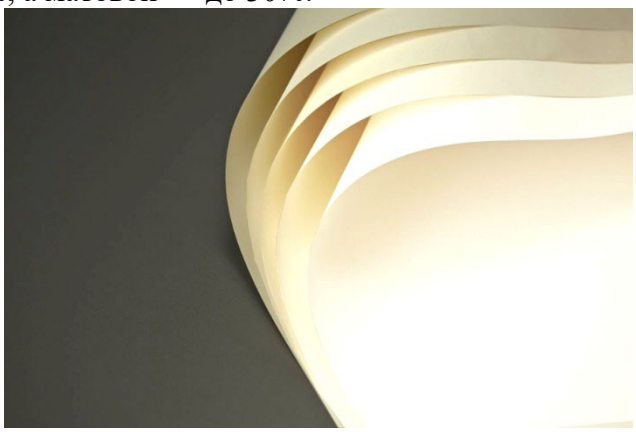


Рисунок 1 – Оптическая яркость листов бумаги.

Многие считают, что глянец — это та конечная характеристика, по которой следует выбирать бумагу. Конечно, различные проспекты, этикетки, репродукции картин прекрасно получаются на бумаге с высоким глянцем. Однако глянец нужен далеко не всегда. Так, для текста или штриховых иллюстраций достаточно бумаги с минимальным глянцем (например, бумаги машинной гладкости).

Механические свойства бумаги:

Механические свойства бумаги можно подразделить на прочностные и деформационные. Деформационные свойства проявляются при воздействии на материал внешних сил и характеризуются временным или постоянным изменением формы или объема тела. Основные технологические операции полиграфии сопровождаются существенным деформированием бумаги. Бумага подвергается таким деформирующим воздействиям, как растяжение, сжатие, изгиб. От того, как ведет себя бумага при этих воздействиях, зависит нормальное течение технологических процессов печатания и последующей обработки. Так, при печатании высоким способом с жестких форм при больших давлениях бумага должна быть мягкой, то есть легко сжиматься, выравниваться под давлением, обеспечивая таким образом наиболее полный контакт с печатной формой.

Мягкость бумаги зависит от ее структуры, то есть от плотности и пористости. Например, крупнопористая газетная бумага может деформироваться при сжатии до 28%, а у плотной мелованной бумаги деформация сжатия не превышает 6-8%. Для высокой печати важно, чтобы эти деформации были полностью обратимыми и после снятия нагрузки бумага полностью восстанавливала первоначальную форму. В противном случае на оттиске будут видны следы оборотного рельефа, говорящие о том, что в структуре бумаги произошли серьезные изменения. И наоборот, если бумага предназначена для отделки тиснением, то целью становится остаточная деформация, а показателем качества является ее необратимость, то есть устойчивость рельефа тиснения.

Для офсетной печати на высокоскоростных ротационных машинах очень важными являются прочностные характеристики бумаги: прочность на разрыв, на излом, стойкость к выщипыванию, влагопрочность. Прочность бумаги зависит не от прочности отдельных компонентов, а от прочности самой структуры бумаги, которая формируется в процессе бумажного производства. Это свойство обычно характеризуется разрывной длиной в метрах или разрывным усилием в ньютонах. Например, для мягких типографских бумаг разрывная длина составляет не менее 2500 м, а для жестких офсетных — до 3500 м и более.

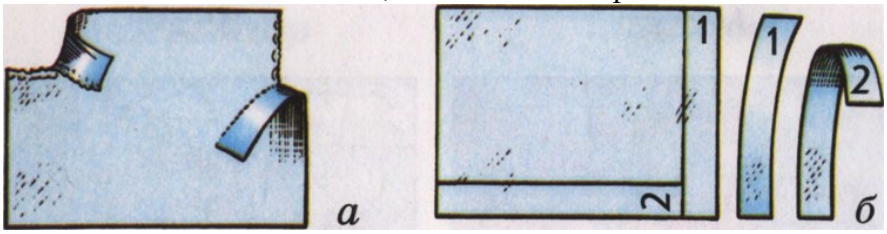


Рисунок 2 – Направление волокн на листе бумаги.

Бумаги, предназначенные для плоской печати, должны иметь минимальную деформацию при увлажнении, так как по условиям технологии печатного процесса они соприкасаются с увлажненными поверхностями. Не секрет, что бумага — материал гигроскопичный. При увеличении влажности волокна набухают и расширяются, главным образом по диаметру, в результате чего бумага теряет форму, коробится и морщится. При высушивании происходит обратный процесс: бумага дает усадку, в результате чего меняется формат. Повышенная влажность резко снижает механическую прочность бумаги на разрыв: бумага не выдерживает высоких скоростей печатания и рвется. Изменение влажности бумаги в процессе многокрасочной печати приводит к не совмещению красок и нарушению цветопередачи.

Для повышения влагостойкости бумаги в процессе ее изготовления в состав бумажной массы добавляют гидрофобные вещества (проклейка в массе) или наносят на поверхность уже готовой бумаги проклеивающие вещества (поверхностная проклейка).

Сорбционные свойства бумаги:

И еще одним важнейшим свойством печатной бумаги является ее впитывающая способность. От умения правильно оценить впитывающую способность зависит выполнение условий своевременного и полного закрепления краски и как результат — получение качественного оттиска.

Впитывающая способность бумаги в первую очередь зависит от ее структуры. Прежде чем говорить об этом, необходимо еще раз вспомнить основные типы структур современных печатных бумаг. Если изобразить структуры бумаги в виде шкалы, на одном из ее концов разместятся крупнопористые бумаги, состоящие целиком из древесной массы, а на другом — чистоцеллюлозные микропористые бумаги. Немного левее расположатся чистоцеллюлозные немелованные бумаги, тоже микропористые, а все остальные займут оставшийся промежуток.

Макропористые бумаги хорошо воспринимают краску, впитывая ее как единое целое. Здесь необходимы маловязкие краски. Жидкая краска быстро заполняет крупные поры, впитываясь на достаточно большую глубину. При чрезмерном ее впитывании может произойти «пробивание» оттиска, в результате которого изображение становится видным с оборотной стороны листа. Повышенная макропористость бумаги нежелательна, например, при иллюстрационной печати, когда чрезмерная впитываемость приводит к потере насыщенности и глянцевитости краски. Для микропористых (капиллярных) бумаг характерен механизм так называемого избирательного впитывания, когда под действием сил капиллярного давления в микропоры поверхностного слоя бумаги впитывается преимущественно маловязкий компонент краски (растворитель), а пигмент и пленкообразователь остаются на поверхности бумаги. Именно это и требуется для получения четкого изображения. Так как механизмы взаимодействия «бумага — краска» в этих случаях различны, для мелованных и немелованных бумаг применяются различные краски.

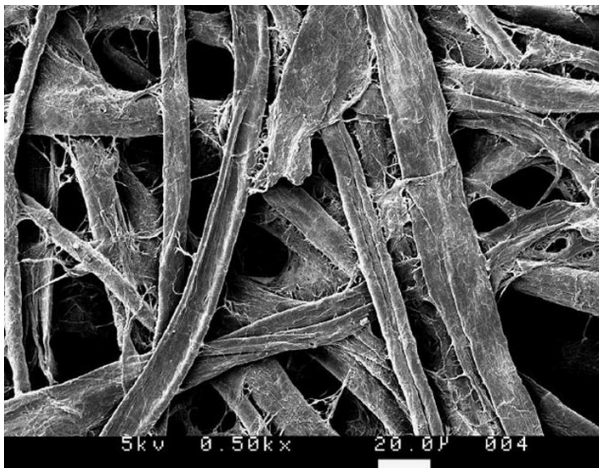


Рисунок 3 – Пористость бумажных волокон.

Таким образом, рассмотренные выше свойства печатных бумаг влияют на качество конечной полиграфической продукции. Поскольку все они взаимосвязаны, не стоит их рассматривать в отдельности.

Использованные источники:

1. [1]Геометрические свойства бумаги. [Электронный ресурс]. URL: https://vuzlit.com/154458/geometricheskie_svoystva_bumagi
2. [2]Особенности структуры и свойства бумаги [Электронный ресурс]. URL: https://www.advesti.ru/publish/poligraf/paper
3. [3]Свойства бумаги: теория и практика. [Электронный ресурс]. URL: https://compuart.ru/article/14526

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ С ПОДВИЖНЫМИ ФАЗОВЫМИ ГРАНИЦАМИ НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМЫХ СЕТКАХ

Мустафин А.М.[1,2], Веселова Н.Н.[2], Лебедев С.Н.[2]
[1] ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.,
[2] ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.
geologtema@mail.ru

В данной работе представлена методика численного решения двумерного уравнения теплопроводности с учетом фазовых переходов на адаптивной сетке схемой «Ромб», включая построение адаптивной разностной сетки, и исследование эффективности применения разработанного метода. Для решения задач о распространении тепла при фазовых переходах, называемых задачами типа Стефана, используется метод сквозного счета на основе применения разностного аналога δ-функции. Получена схема «Ромб» на адаптивно-встраиваемой сетке, приведен алгоритм построения адаптивной разностной сетки. В статье приведены численные решения задачи о воздействии теплового пучка на лёд. Полученные численные результаты наглядно продемонстрировали эффективность применения адаптивно-встраиваемых сеток совместно с методом сквозного счета в случае решения задач типа Стефана.

Ключевые слова: теплопроводность, адаптивные сетки, разностная схема «Ромб», двумерное уравнение теплопроводности, адаптация в многомерном пространстве, связанная сеть, фазовый переход, задача Стефана.

NUMERICAL SOLUTION OF A 2D PROBLEM WITH MOVABLE PHASE BOUNDARIES ON ADAPTIVELY INCORPORATED MESHES

Mustafin A.M.[1,2], Veselova N.N.[2], Lebedev S.N.[2]
[1] Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region
[2] Zababakhin RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk Region
geologtema@mail.ru

The paper discusses a numerical technique for solving a 2D radiative heat transfer equation with phase transitions on adaptive meshes by a ROMB scheme, including the construction of the adaptive difference mesh and the efficiency testing of the developed technique. The problems of heat transfer during phase transitions, referred to as Stephan's type problems, are solved by a once-through method based on the use of a difference analog of the δ-function. A ROMB scheme on the adaptive mesh is developed and an algorithm for mesh construction is presented. Numerical solutions are provided for the problem of thermal beam impact on ice. The results demonstrate the effective use of adaptive meshes in once-through calculations for solving Stephan type problems.

Key words: heat transfer, adaptive mesh, ROMD difference scheme, 2D heat transfer equation, adaptation in multidimensional space, linked network, phase transition, Stephan's problem.

Введение. В работе исследуется обобщение одного из подходов к численному решению уравнения теплопроводности в трехфазных средах с двумя нестационарными межфазовыми границами. Задачи такого типа принято называть задачами Стефана [6].

Рассматривается общий случай динамики температурных полей твердого вещества в результате нагрева. Сложность построения вычислительного алгоритма для задачи Стефана заключается в том, что граница раздела фазовых состояний подвижна. Существует множество методов решения данной проблемы [4], однако далеко не все из них применимы в случае многомерных задач.

Данная работа рассматривает метод сквозного счета с сведением нескольких уравнений для разных фаз к одному общему уравнению теплопроводности посредством введения одного из аналогов δ-функции. Точность выбранной методики повышается за счет использования вместо классической разностной сетки – адаптивной [7], [1], которая позволяет динамически сгущать сетку в окрестности фронта фазового перехода.

Ранее был предложен подход к решению задачи Стефана в одномерном случае, основанный на методе сквозного счета и применении схемы «Ромб» [11], [12] к решению уравнений. Исследования [10] показали высокую эффективность применения такого подхода к решению одномерных задач с фазовыми превращениями. В текущей статье выбранная методика обобщается на случай двумерных задач. Для этого строится двумерная разностная схема «Ромб» с учетом особенностей адаптивной разностной сетки, связанных, прежде всего, с её нерегулярностью в двумерном пространстве.

Постановка задачи. Вещество, заполняющее область G в двумерном пространстве Oxy в начальный момент времени находится в твердом состоянии при некоторой постоянной температуре T_0. На одной из границ области устанавливается мощный источник тепла, например, температура T_h, причем $T_h > T_s > T_f$, где T_s - температура кипения, T_f - температура плавления (кристаллизации). В общем случае температура T_h является функцией от времени и координат границы. В поставленных условиях вещество начнет плавиться и, в последующем, испаряться. Обозначим границы плавления и кипения, как Γ_f и Γ_s, при условии, что температуры на них соответствуют температурам фазовых переходов.

Таким образом, рассматриваемая часть вещества имеет три зоны с соответствующими фазами состояния – твердое, жидкое и газообразное, а также две границы фазовых переходов – плавление и кипения. Переход вещества из твердого в жидкое состояние на границе осуществляется при затрачивании удельной теплоты L_f. При испарении затраты соответствуют удельной теплоте парообразования L_s. В текущей постановке предполагается, что перенос тепла осуществляется только за счет теплопроводности, а движением вещества пренебрегается.

Процесс распространения тепла в веществе описывается дифференциальным уравнением вида

$$\rho_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = div\left(\chi_i \cdot grad\left(T\right)\right) + f\,, \tag{1}$$

где $i = \{s, l, g\}$ - индекс состояния вещества (твердое, жидкое, газообразное), $T = T(x, y, t)$ - температура, $\varepsilon_i(\rho_i, T)$ - удельная внутренняя энергия, ρ_i - плотность, $\chi_i\left(\rho_i, T\right)$ - коэффициент теплопроводности, $f(x, y, t)$ - плотность тепловых источников.

На границах фазовых переходов (плавления, испарения соответственно) вводятся условия Стефана [6] для потоков:

$$\begin{aligned} \chi_l\, grad\left(T\right)\Big|_{\Gamma_f - 0} - \chi_s\, grad\left(T\right)\Big|_{\Gamma_f + 0} &= L_f \rho \frac{d\xi_1}{dt}, \\ \chi_g\, grad\left(T\right)\Big|_{\Gamma_s - 0} - \chi_l\, grad\left(T\right)\Big|_{\Gamma_s + 0} &= L_s \rho \frac{d\xi_2}{dt}, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\xi_1(x, y, t)$, $\xi_2(x, y, t)$ - функции описывающие изменение положения межфазовых границ с течением времени.

Таким образом, для каждой зоны со своим фазовым состоянием вещества решается уравнение со своими коэффициентами. Согласно методике, ранее разработанной для одномерных трехфазовых задач теплопроводности [10] уравнения, описывающие трехфазную задачу Стефана (1)-(2), можно записать в виде

$$\rho\tilde{C}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = div\left(\chi \cdot grad(T)\right) + f, \quad \tilde{C}(T) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + L_f \cdot \delta(T - T_f) + L_s \cdot \delta(T - T_s), \qquad (3)$$

где $\rho = \rho(T)$ - функция, задающая плотность вещества; $\chi = \chi(T)$ - функция, задающая коэффициент теплопроводности. В случае линейной зависимости энергии от температуры внутренняя энергия определена выражением $\varepsilon(T) = c_v \cdot T$, в котором c_v - функция, определяющая коэффициент удельной теплоемкости.

Уравнение (3) является общим уравнением для всей области определения, объединяющим в себе уравнения для подобластей с разными фазами состояния вещества [13], [5]. Для рассматриваемого вещества вводятся разрывные функции для плотности, коэффициентов теплоемкости и коэффициентов теплопроводности, так как в зависимости от фазы они меняют свое значение. Поскольку смена фазы определяется температурой, то и эти величины будут зависеть от интервала температур для всей фазы. То есть

$$c_v(T) = \begin{cases} c_s, & T < T_f, \\ c_l, & T_f \le T \le T_s, \\ c_g, & T > T_s, \end{cases} \quad \chi(T) = \begin{cases} \chi_s, & T < T_f, \\ \chi_l, & T_f \le T \le T_s, \\ \chi_g, & T > T_s, \end{cases} \quad \rho(T) = \begin{cases} \rho_s, & T < T_f, \\ \rho_l, & T_f \le T \le T_s, \\ \rho_g, & T > T_s, \end{cases}$$

где c_s, c_l, c_g - удельные коэффициенты теплоемкости, χ_s, χ_l, χ_g - удельные коэффициенты теплопроводности, ρ_s, ρ_l, ρ_g - плотности соответственно для твердого, жидкого и газообразного состояний исследуемого вещества.

В численных расчетах δ-функции Дирака заменяется аналогом (аппроксимацией) вида

$$\delta(T) = \frac{1}{a\sqrt{\pi}} \cdot e^{-(T/a)^2}, \qquad (4)$$

где $a = \Delta \big/ \left(2\sqrt{\pi}\right)$, Δ - параметр, определяющий полуширину колокола функции [5] на оси температур.

Выбранный подход предлагает от разрывных функций характеристик вещества, зависящих от температурных интервалов, перейти к непрерывным гладким функциям. В области действия δ-функции $\left(T \le |\Delta|\right)$ производится сглаживание перехода от одной величины к другой в разрывных функциях теплоемкости, теплопроводности и плотности. Вводится функция сглаживания

$$\gamma(T) = \frac{1}{2}\cos\left(\frac{\pi(T + \Delta)}{2\Delta}\right) + \frac{1}{2} \qquad (5)$$

Для каждого фазового перехода определяется свой температурный диапазон воздействия функции сглаживания и δ-функции. В случае трехфазовой задачи задаются диапазоны Δ_f и Δ_s - плавления и испарения, соответственно.

Введя понятие теплового потока согласно закону Фурье [14], запишем уравнение (3) в потоковой форме

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T}{\partial t} = -\dfrac{1}{\rho\tilde{C}(T)} div\left(\vec{W}\right) + \dfrac{1}{\rho\tilde{C}(T)} f, \\ \vec{W} = -\chi \cdot grad\left(T\right). \end{cases} \qquad (6)$$

В области $G = [a_x \le x \le b_x] \times [a_y \le y \le b_y]$ при $t \in \left[0, t_{\max}\right]$ для уравнения (6) решается начально-краевая задача

$$\begin{cases} T(x,y,0)=\varphi(x,y), & (x,y)\in G, \\ \alpha T+\beta\left(\vec{W}\cdot\vec{n}\right)=\psi(x,y,t), & (x,y)\in L, \end{cases} \tag{7}$$

где L - внешняя граница прямоугольной области G, $\varphi(x,y)$ - заданное начальное распределение температуры, $\psi(x,y,t)$ – заданная функция на границах области, α и β - параметры, с помощью которых можно задавать граничные условия различного типа, $\vec{n}$ – внешняя нормаль.

Адаптивная разностная сетка. Пусть на плоскости Oxy определена равномерная разностная сетка с шагами h_x (по x) и h_y (по y)

$$\omega_{h_x h_y}=\omega_{h_x}\times\omega_{h_y},\quad \omega_{h_x}=\left\{x_j=j\cdot h_x,\ j=0,1,2,...,J\right\},\quad \omega_{h_y}=\left\{y_i=i\cdot h_y,\ i=0,1,2,...,I\right\},$$

расширенная во временную область с некоторым шагом по времени τ

$$\omega_{h_x h_y \tau}=\omega_{h_x}\times\omega_{h_y}\times\omega_\tau,\quad \omega_\tau=\left\{t_n=n\cdot\tau,\ n=0,1,2,...\right\}.$$

Взамен такой исходной сетки вводится адаптивная сетка [9], схематично изображенная на рисунке 1. Данная сетка является нерегулярной и не может быть записана в привычном матричном виде.

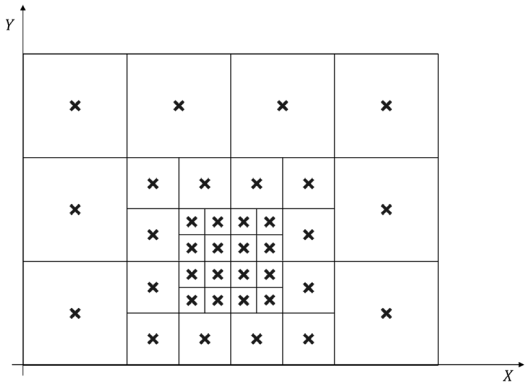


Рис. 1. Адаптивная разностная сетка

Пусть все количество ячеек исходной регулярной сетки составляет $I\cdot J$. Количество ячеек, полученное в результате адаптации, составляет $4P$, где P - число ячеек, подвергшихся дроблению. Число ячеек, участвующих в счете, $K=I\cdot J+4P$. Тогда массив ячеек с номерами $k=0,1,2,...,K-1$ имеет следующие характеристики каждой отдельной ячейки:

$$\left(\tilde{h}_x\right)_k=h_x/2^{L_k}\ \text{ и }\ \left(\tilde{h}_y\right)_k=h_y/2^{L_k}, \tag{8}$$

где h_x и h_y - пространственные шаги исходной регулярной сетки, L - уровень адаптации k-ой ячейки.

Решение разностных уравнений осуществляется шагами по времени. Перед расчетом следующего шага имеем поле температуры и плотности, определенное на некоторой сетке n-го временного слоя. Для следующего шага $(n+1)$ по времени строится новая адаптивная сетка, на которую отображаются температура и плотность. Исходные или уже подробленные ячейки, удовлетворяющие условиям адаптации, делятся на четыре равные ячейки меньшего размера. При этом для слоя $(n+1)$ по времени подробленные ячейки с предыдущего временного слоя, не удовлетворяющие условию адаптации, объединяются. В таком случае температура определяется по суммарной энергии ячеек, образующих исходную ячейку.

Условием адаптации при переходе с нулевого уровня на первый выступает попадание центра ячейки в ε-окрестность заданной величины $O_\varepsilon(D)=\left\{(x,y):\sqrt{(x-x_D)^2+(y-y_D)^2}<\varepsilon\right\}$. Для перехода на второй уровень дробления центр

ячейки должен попадать $O_{\varepsilon/2}(D)$. В данной работе величина D соответствует точкам принадлежащим границе фазовых переходов.

Разностная схема «Ромб». При помощи метода расщепления [8] осуществляется переход от двумерного уравнения теплопроводности к двум одномерным в соответствии с каждым направлением. Разностная схема «Ромб» [11] для решения полученных уравнений записывается в виде двух систем линейных алгебраических уравнений. При $j+1/2=const, j=\overline{0,J-1}$ решается система

$$\begin{cases} T_i^{\mu+1/2}+T_{i+1}^{\mu+1/2}+\left[2\delta_{i+1/2}+\dfrac{2\tau}{\tilde{C}m}\right]\Delta_i\left(W_y\right)^{\mu+1/2}=2\left(T^n+\dfrac{\tau}{\tilde{C}\rho}f^{n+1}-\dfrac{\tau}{\tilde{C}m}\Delta_j\left(W_x\right)^{\mu}\right), \\ 2\chi_y^{\mu}\dfrac{h_x^2}{\Delta S}\Delta_i\left(T\right)^{\mu+1/2}+\left(W_y\right)_i^{\mu+1/2}+\left(W_y\right)_{i+1}^{\mu+1/2}=0, \end{cases} \tag{9}$$

при $i+1/2=const, i=\overline{0,I-1}$ решается система

$$\begin{cases} T_j^{\mu+1}+T_{j+1}^{\mu+1}+\left[2\delta_{j+1/2}+\dfrac{2\tau}{\tilde{C}m}\right]\Delta_j\left(W_x\right)^{\mu+1}=2\left(T^n+\dfrac{\tau}{\tilde{C}\rho}f^{n+1}-\dfrac{\tau}{\tilde{C}m}\Delta_i\left(W_y\right)^{\mu+1/2}\right), \\ 2\chi_x^{\mu}\dfrac{h_y^2}{\Delta S}\Delta_j\left(T\right)^{\mu+1}+\left(W_x\right)_j^{\mu+1}+\left(W_x\right)_{j+1}^{\mu+1}=0, \end{cases}, \tag{10}$$

где δ - параметр схемы, m - масса ячейки, $\Delta_i(\circ)=\left((\circ)_{i+1}-(\circ)_i\right)$ - величины определенные на гранях ячейки, остальные величины, не входящие в оператор Δ, относятся к центру ячеек (индексы $i+1/2$ и $j+1/2$ опущены). СЛАУ (9) и (10) далее решаются с помощью алгоритма встречной потоковой прогонки [11]. Предполагается по аналогии с граничными условиями (7) следующая связь между искомыми T и W на каждом ребре ячейки

$$\begin{cases} \left(X^+\right)T+\left(Y^+\right)W=\left(Z^+\right), \\ \left(X^-\right)T+\left(Y^-\right)W=\left(Z^-\right), \end{cases} \tag{11}$$

где X^+, Y^+, Z^+ - коэффициенты прогонки (инварианты) на «внутренней стороне» ребра ячейки, а X^-, Y^-, Z^- - на «внешней стороне».

Затем из значений, полученных на гранях, восстанавливается температура в центре ячейке для каждой системы из соответствующего уравнения баланса:

$$T_{i+1/2}^{\mu+1/2}=T^n+\frac{\tau}{\tilde{C}\rho}f^{n+1}-\frac{\tau}{\tilde{C}m}\left[\left(W_x\right)_{j+1}-\left(W_x\right)_j\right]^{\mu}-\frac{\tau}{\tilde{C}m}\left[\left(W_y\right)_{i+1}-\left(W_y\right)_i\right]^{\mu+1/2}, \tag{12}$$

$$T_{j+1/2}^{\mu+1}=T^n+\frac{\tau}{\tilde{C}\rho}f^{n+1}-\frac{\tau}{\tilde{C}m}\left[\left(W_x\right)_{j+1}-\left(W_x\right)_j\right]^{\mu+1}-\frac{\tau}{\tilde{C}m}\left[\left(W_y\right)_{i+1}-\left(W_y\right)_i\right]^{\mu+1/2}. \tag{13}$$

Особенности счета на адаптивной сетке. При использовании адаптивной сетки необходимо учитывать, что в соседях друг с другом могут оказаться ячейки с разными уровнями адаптации. Ввиду того, что схема «Ромб» аппроксимирует уравнение в пределах одной ячейки, при вычислении коэффициентов СЛАУ (22) и (27) не играет роли размер соседних ячеек, достаточно знать шаги по пространству (размеры) для конкретной текущей ячейки, вычисленные по формулам (8).

Методы прогонки не приспособлены к нерегулярному виду сеток. Поэтому необходимо доработать данный алгоритм. Удобно при работе на адаптивной сетке выполнять счет вдоль каналов исходной регулярной сетки $j+1/2=const$ и $i+1/2=const$. В ходе вычислений в каждой ячейке на гранях определяются значения инвариантов согласно алгоритму прогонки. При этом значения на грани ячейки противоположной ходу прогонки, получаются от смежных ячеек или в случае границы области – из граничных условий. Если уровни адаптации текущей ячейки не совпадает с соседними, то на их общем ребре ставятся краевые условия второго рода в соответствии с (11).

Программная реализация адаптивной сетки. Адаптивная сетка представляет собой нерегулярную разностную сетку. Для хранения данных такой сетки спроектирована сложная структура данных [2], [3], в которой единичным элементом выступает ячейка разностной сетки, состоящая из блока связей и информационного блока. Набор таких элементарных структурных единиц образует *связанную сеть* [2], соответствующую адаптивной разностной сетке. Адаптация данной сети к новым условиям происходит динамически. Для этого просто добавляются и удаляются блоки ячеек потомков, хранящиеся в стеке адаптивных ячеек (буфере адаптации), организованном по технологии LIFO [2]. Ссылки на соседей ячеек хранятся аналогично в стеках определенных для каждой грани ячейки. При дроблении ячейки формируется блок ячеек потомков, состоящий из четырех ячеек. Затем устанавливается связь между ячейкой родителем и блоком, который добавляется в стек буфера адаптации. При объединении ячеек адаптивной сетки, относящихся к одному блоку потомков, вычисляется значение для ячейки родителя и происходит удаление блока ячеек потомков из стека, при этом оставшиеся связи устанавливаются на нулевое значение.

Задача о воздействии теплового пучка на лёд. Рассмотрим задачу о плавлении и испарении льда под воздействием теплового пучка заданной формы. Данная задача в грубой форме моделирует эффект воздействия лазерным излучением в виде пучка, направленного на поверхность материала. Единицы измерения соответствуют системе СИ и в некоторых случаях опущены.

В области $G=[0\le x\le 0.2]\times[0\le y\le 0.02]$ при $t\in[0,t_{end}]$ для уравнения (6) задается начально-краевая задача (рисунок 2)

$$\begin{cases} T(x,y,0)=T_0=253, & x,y\in G, \\ W(0,y,t)=0,\ W(0.2,y,t)=0, & y\in L, \\ W(x,0,t)=0, & x\in L, \\ W(x,0.02,t)=0, & x\in L,\ x<0.06,\ x>0.14, \\ T(x,0.02,t)=473, & x\in L,\ 0.06\le x\le 0.14, \end{cases} \tag{14}$$

где L - внешняя граница прямоугольной области G.

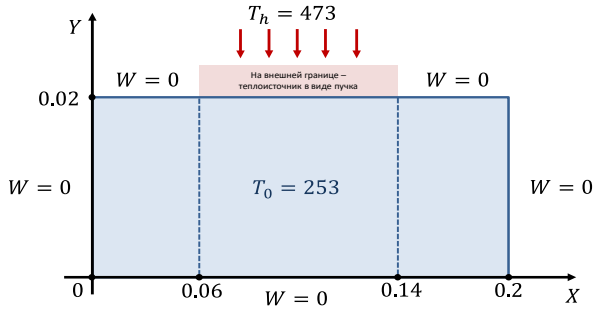


Рис. 2. Схематичное изображение задачи о воздействии теплового пучка

Заполняющее область G, вещество имеет характеристики [15]: в состоянии льда - $\rho_s=900\ кг/м^3$, $c_s=2100\ Дж/(кг\cdot K)$, $\chi_s=2.33\ Вт/(м\cdot K)$; в виде воды $\rho_l=1000\ кг/м^3$, $c_l=4187\ Дж/(кг\cdot K)$, $\chi_l=0.6\ Вт/(м\cdot K)$; в виде пара $\rho_g=0.59\ кг/м^3$, $c_g=2020\ Дж/(кг\cdot K)$, $\chi_g=0.03\ Вт/(м\cdot K)$. Температура и удельная теплота каждого перехода соответственно $T_f=273°K$ и $L_f=3.3\times10^5\ Дж/кг$, $T_s=373°K$ и $L_s=22.58\times10^5\ Дж/кг$. Для δ-функции задаются параметры: $\Delta_f=10°K$, $\Delta_s=50°K$.

В результате проведения вычислений с шагом по времени $\tau=1\cdot10^{-2}\ c$ были получены численные решения на различных сетках с использованием и без алгоритма адаптации. Измельчение сетки осуществлялось в ε-окрестности границы смены фаз $(\varepsilon=0.004\,м)$ в два

уровня адаптации. Результаты нескольких вычислений представлены в виде распределений температур на момент времени $t_{end} = 500\ c$ на рисунке 3.

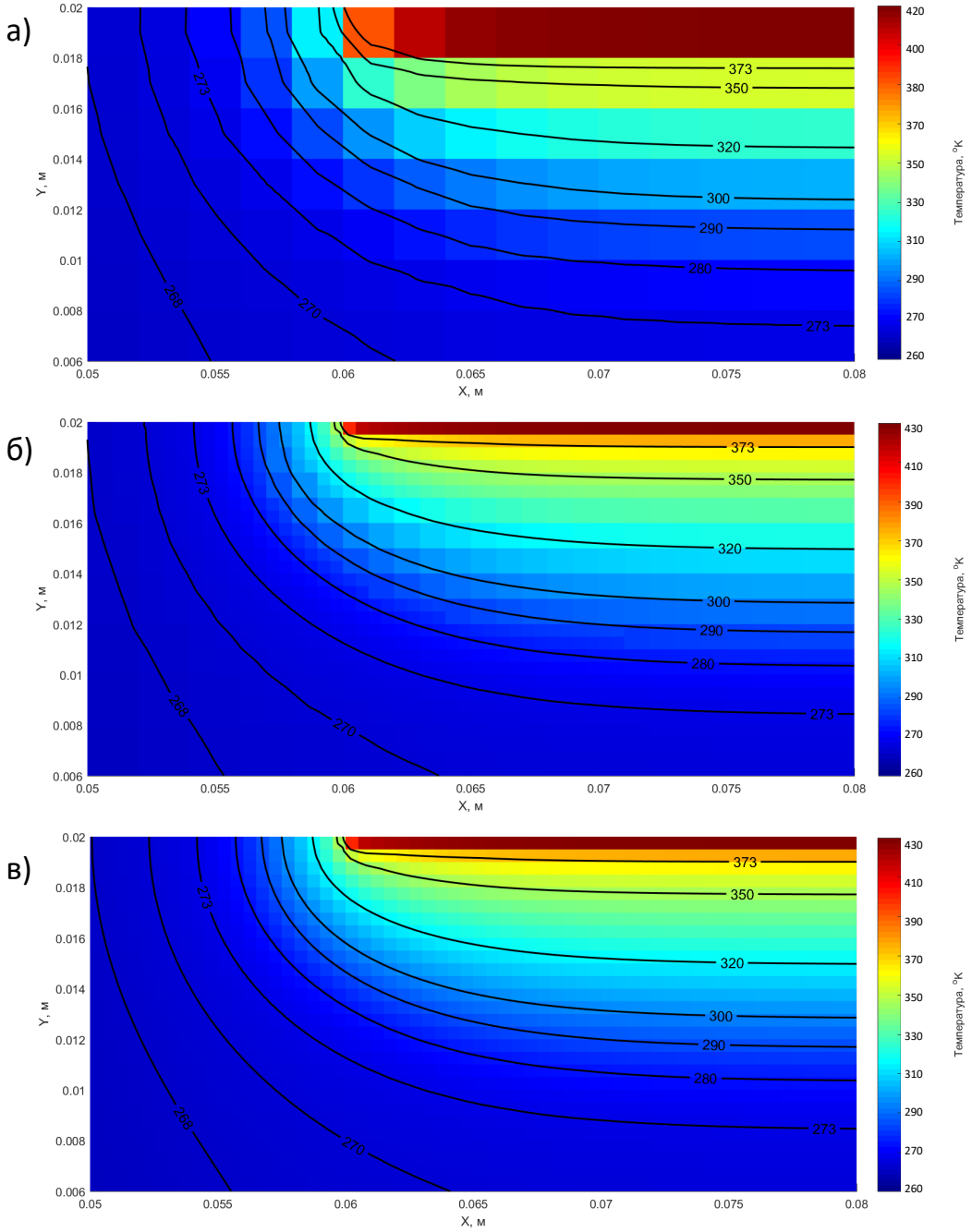


Рис. 3. Распределение температуры на участке области G, полученные: (а) - на исходной сетке 100x10; (б) - на адаптивной сетке с исходным числом ячеек 100x10; (в) - на подробной сетке 400x40

Из рисунка 3 видно, что решение на адаптивной сетке с исходным числом ячеек 100x10 значительно отличается от решения, полученного без адаптации, но при этом достаточно близко к решению, полученному на подробной сетке 400x40 ячеек.

Рассмотрим отдельно, как различаются между собой полученные распределения. На рисунке 4 изображены изолинии из рисунка 3, соответствующие температурам плавления и кипения, построенные для численных решений на различных сетках.

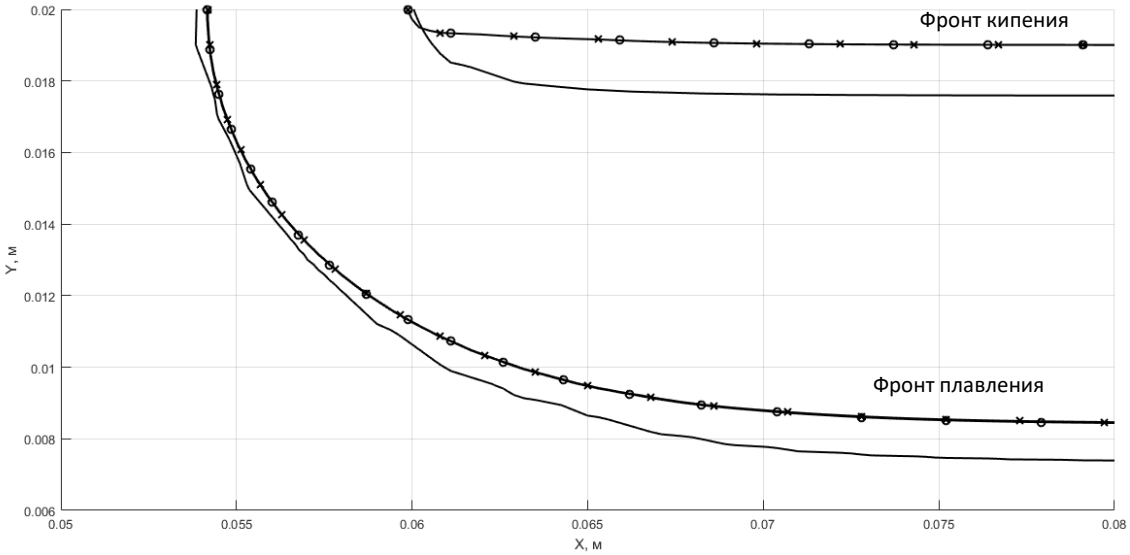


Рис. 4. Профили изолиний соответствующих температур плавления и кипения для различных численных решений: —— - на исходной сетке 100x10, -o- - на сетке 100x10 с адаптацией, -x- - на подробной сетке 400x40 ячеек.

Рисунок 4 показывает, что профили изолиний, соответствующих фронтам фазовых переходов для решений на подробной сетке 400x40 и на адаптивной сетке с исходным числом ячеек 100x10, практически совпадают друг с другом. В то время как решение на грубой сетке согласно профилям изолиний значительно отличаются от решений на адаптивной сетке.

В условиях, когда аналитическое решение задачи отсутствует, для сравнения численных решений между собой удобно применять норму, представленную разностным интегралом температурного распределения, нормированным на площадь заданной области

$$\|T\| = \left(\sum_{k=0}^{K} T_k \cdot \Delta S_k \right) \Big/ S_G , \qquad (15)$$

где ΔS_k - площадь k-ой ячейки, T_k - температура в центре k-ой ячейки, S_G - площадь области определения.

В таблице 1 приведены результаты исследования разностной нормы (15) при последовательном измельчении исходной сетки. Показано отклонение значений нормы численных решений от нормы для решения на подробной сетке 800x80.

Число ячеек исходной сетки	Исходная сетка			Адаптивная сетка		
	Норма (15)	Δ, %	Время счета, с	Норма (15)	Δ, %	Время счета, с
100×10	278.320	1.014	284	275.740	0.078	16350
200×20	276.683	0.420	3571	275.537	0.004	87320
400×40	275.707	0.066	35123	–	–	–
800×80	275.526	0	173684	–	–	–

Табл. 1. Сравнение норм численного решения и времени вычисления на различных сетках

Результаты из таблицы 1 свидетельствуют о том, что имеет место сходимость численных решений по мере измельчения разностной сетки. Не трудно заметить достаточно близкое соответствие норм численных решений, полученных на грубой сетке с алгоритмом адаптации и на подробной сетке в 4 раза мельче. При соответствии норм, вычисление на грубой сетке с адаптацией заняло в 2 раза меньше времени.

Заключение**.** В данной работе рассмотрен метод численного решения двумерных задач теплопроводности с фазовыми переходами (задач Стефана) на основе применения аналога δ-функции. Для решения данных задач используется разностная схема «Ромб», обобщенная для нерегулярных адаптивных сеток. Адаптивная сетка строится на основе сложной структуры данных – связанной сети. Применение построенного алгоритма для численного решения задачи о плавлении и испарении льда показало, что использование адаптивных сеток совместно с методом сквозного счета на основе δ-функции позволяет весьма эффективно решать задачи с фазовыми переходами.

Использованные источники:

1. Thompson J.F. Grid Generation Techniques in Computational Fluid Dynamics. // AIAA J. 1984. Vol. 22, No. 11, pp.1505-1523.
2. Аксенова Е.А., Соколов А.В. Алгоритмы и структуры данных на С++. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. – 81с.
3. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. - 3-е изд. – М.: Вильямс, 2019. - 1328 с.: ил.
4. Бородин С.Л. Численные методы решения задачи Стефана // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1, Вып. 3. С. 164-175.
5. Владимиров В.С. Уравнения математической физики.– М.: Наука, 1971. – 512 с.
6. Данилюк И.И. О задаче Стефана. // Успехи математических наук. 1985. Том 40, Вып. 5. С. 133-185.
7. Дарьин Н.А., Мажукин В.И. Об одном подходе к построению адаптивных сеток. Доклад АН СССР. 1988. Том 298, Вып. 1. С 64-68.
8. Марчук Г.И. Методы расщепления. Москва: Наука, 1988. – 263 с.
9. Мустафин А.М., Пашенцева Н.Н., Лебедев С.Н. Решение двумерного уравнения теплопроводности разностной схемой «Ромб» на адаптивно-встраиваемых сетках. 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. - 185с.
10. Мустафин А.М., Пашенцева Н.Н., Лебедев С.Н. Численное решение уравнения теплопроводности в одномерных задачах с фазовыми переходами методом сквозного счета с использованием схемы «Ромб» // Вопросы Атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2022. Вып. 4. С. 19-32.
11. Писарев В.Н. Параметрическое семейство схем «Ромб» для двумерного уравнения теплопроводности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып. 3. С. 42-48.
12. Писарев В.Н. Параметрическое семейство схем «Ромб» для одномерного уравнения теплопроводности // Вопросы Атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1986. Вып. 2. С. 67-75.
13. Самарский А.А. Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Том 5, Вып. 5. С. 816-827.
14. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
15. Физические величины: справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. / под. ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991.- 1232 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С РАСКАТЫВАНИЕМ

Нагорнов А.А.[1], Ена В.А.[1], Федоров А.А.[2], Козлов А.В.[1], Бобылев А.В.[1]
[1]*Трёхгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ТТИ НИЯУ МИФИ), г. Трёхгорный, Челябинская обл.*
[2]*ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет)» ЮУрГУ, г. Челябинск, Челябинская обл.*
a_kozlov55@mail.ru, nagornov98@mail.ru, v.ena@icloud.com, fedorovandrey128@mail.ru

Гибка труб является одной из основных операций технологического процесса изготовления деталей трубопроводов. При гибке труб с раскатыванием тепловые явления определяют температуру в зоне гибки, определяют интенсивность износа инструмента (раскатных шариков), следовательно, и его стойкость. С целью установления процесса распределения теплоты в зоне гибки, были проведены натурные эксперименты с применением искусственной термопары и тепловизора. Было проведено сравнение двух методов измерения температуры, была измерена температура в зоне раскатывания без использования охлаждения и на поверхности трубы.

Ключевые слова: тепловые явления, гибка труб, специальный станок, искусственная термопара, тепловизор.

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF COOLING IN PIPE BENDING WITH ROLLING

Nagornov A.A.[1], Ena V.A.[1], Fedorov A.A.[2], Kozlov A.V.[1], Bobylev A.V.[1]
[1]*Tryokhgorny Institute of Technology - branch of the National Research Nuclear University "MEPhI" (TTI NRNU MEPhI), Tryokhgorny, Chelyabinsk region.*
[2] *South Ural State University (National Research University) South Ural State University, Chelyabinsk, Chelyabinsk region.*
a_kozlov55@mail.ru, nagornov98@mail.ru, v.ena@icloud.com, fedorovandrey128@mail.ru

Pipe bending is one of the main operations of the technological process of manufacturing pipeline parts. When pipes are bend with rolling, thermal phenomena determine the temperature in the bending zone, the wear rate of the tool (rolling balls) and therefore its durability. In order to establish the process of heat distribution in the bending zone field experiments were conducted using an artificial thermocouple and a thermal imager. Two measurement methods, in the rolling zone without the use of cooling and on the pipe surface, were compared.

Key words: thermal phenomena, pipe bending, special machine, artificial thermocouple, thermal imager.

Тепловые явления в процессе раскатывания и гибки трубы играют значительную роль. Именно они определяют температуру в зоне гибки, которая оказывает прямое влияние на величину сил гибки и микроструктуру поверхностного слоя заготовки. Существенная часть теплоты, выделяемой при пластической деформации, приходится на нагрев инструмента., что оказывает существенное влияние на интенсивность износа инструмента (раскатных шариков), следовательно, и его стойкость. При повышении локальных температур в зоне раскатывания (температура в зоне раскатывания может достигать 650...700 °С) у раскатных шариков может произойти низкотемпературный отпуск, который изменит механические свойства шариков, чем заметно ускорит их износ.

Для рациональной компоновки трубопроводов и других изделий, изготавливаемых из труб, требуется большое количество их криволинейных участков. В современных производственных условиях осуществить качественную гибку труб диаметром более 50 мм в холодном состоянии достаточно сложно. Связано это с тем, что она сопровождается такими нежелательными для последующей эксплуатации явлениями, как утончение стенки на внешней части гиба, сплющивание поперечного сечения, образование гофр и изломов на внутренней части гиба.

Процесс гибки с раскатыванием можно описать следующим образом: при вращении (с помощью электродвигателя) раскатника, заведенного в тонкостенную трубу из титанового сплава с большим натягом, в каждой точке соприкосновения раскатника со стенкой трубы возникает знакопеременный изгиб, при котором изгибные напряжения кратковременно достигают предела текучести. В результате при приложении небольшого изгибающего усилия, с помощью изгибного и упорного роликов, происходит холодная гибка тонкостенной трубы в перемещающейся кольцевой зоне раскатывания.

Опыт показывает, что процесс гибки с раскатыванием неразрывно связан с выделением тепла в зоне гиба. Причины его возникновения, характер распределения, а также процессы теплообмена между элементами технологической системы в зоне деформаций еще недостаточно изучены.

Пластическое течение металла при гибке с раскатыванием представляет собой сдвиг одной части материала трубы по отношению к другой, что является основной причиной выделения тепла в зоне гиба. Неравномерность распределения тепла по сечению трубы обусловлена как различной интенсивностью деформаций в разных участках сечения, так и теплообменом с элементами оснастки станка (раскатным инструментом, роликом-шаблоном и т. д.). В ходе гибки ролик-шаблон наматывает изгибаемую трубу, создавая тем самым плотный контакт ложемента ролика и внутренней стенки трубы. Это обеспечивает постоянный теплоотвод от этой части гиба, и поэтому температура здесь несколько ниже, чем на внешней стенке.

В результате холодной гибки тонкостенных труб, раскатываемых с большими натягами, происходят различного рода искривления и деформации, в числе которых: удлинение внешней стенки трубы, укорачивание внутренней стенки, а также изменение длины боковой стенки. В результате это приводит к преобразованию формы и исходной толщины стенок тонкостенной трубы в поперечном сечении. Схема деформации трубы при изгибе представлена на рисунке 1.

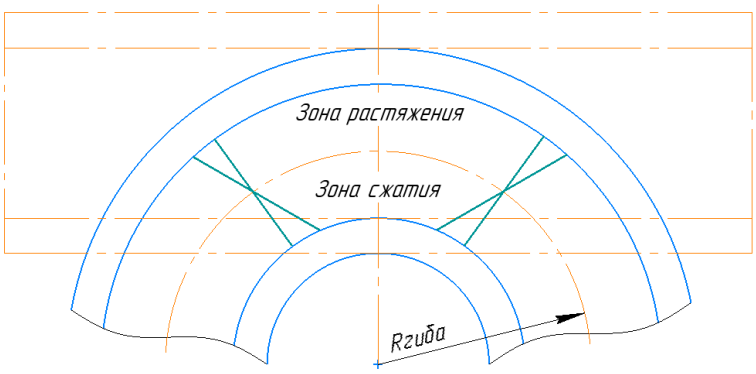


Рисунок 1 – Схема деформации трубы при изгибе

Для выявления характера распределения тепла в зоне раскатывания и величин нагрева рабочих элементов проведена серия экспериментов с использованием следующих методов измерений: с помощью искусственной термопары и тепловизора.

При проведении экспериментов использовались трубы из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т и титанового сплава марки ВТ01

Для определения максимальной температуры гиба в первом опыте эксперимент проводился без применения охлаждения. Его результаты приведены на рис. 3

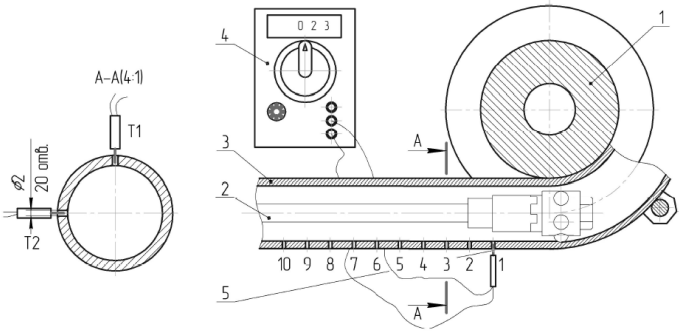


Рисунок 2 – Схема измерения с помощью искусственной термопары

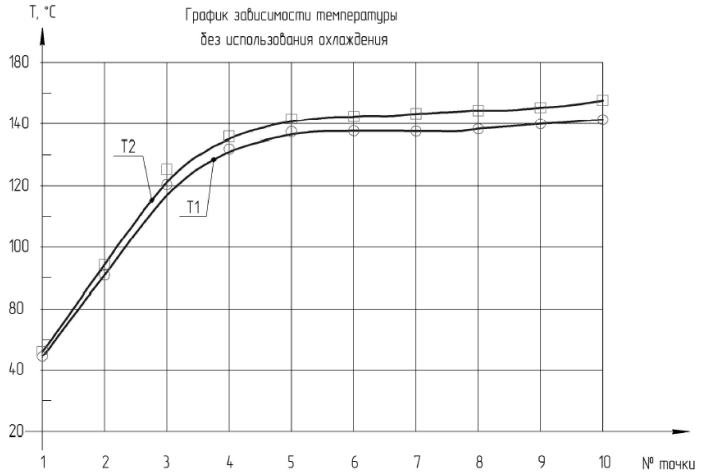


Рисунок 3 – Результаты измерения с помощью искусственных термопар без применения охлаждения

На рисунках 4,5 приведены графики изменения температуры в зоне раскатывания с применением различных типов охлаждения.

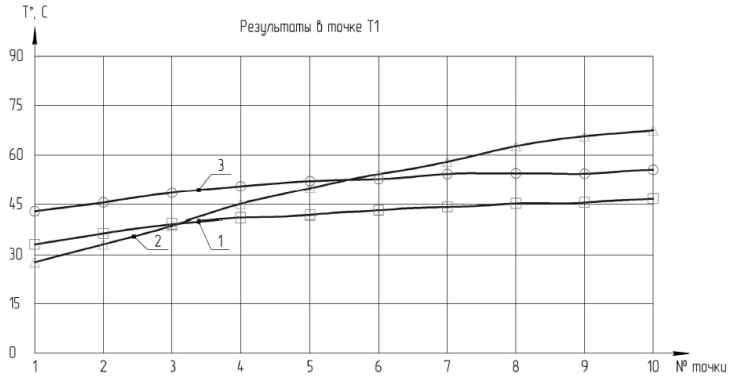


Рисунок 4 – График изменения температуры в зоне раскатывания (T1) с применением различных типов охлаждения

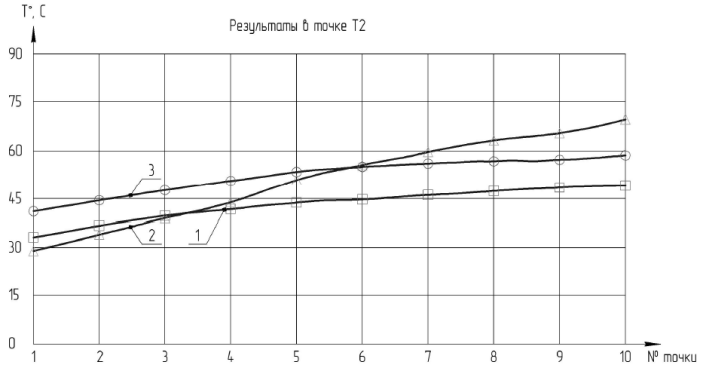
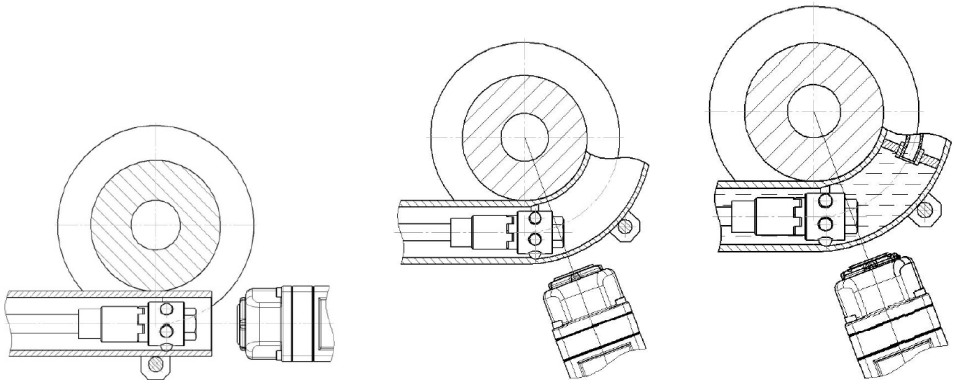


Рисунок 5 – График изменения температуры в зоне раскатывания (Т2) с применением различных типов охлаждения

Измерения термопарой позволили получить лишь приблизительную картину распределения тепла при гибке труб с раскатыванием. Кроме того, термопара хоть и незначительно, но удалена от зоны обработки и не дает реальной картины непосредственно в зоне работы инструмента.

В ходе проведения эксперимента осуществлялось также измерение температуры в зоне изгиба тонкостенной трубы с помощью тепловизора по схеме, представленной на рисунке 6.



а б в

Рисунок 6 – Схема замера температур с помощью тепловизора: а – с торца;

б – со стороны зоны раскатывания; в – со стороны зоны раскатывания

Измерения температуры при гибке труб с раскатыванием проводились на установке для гибки труб малого диаметра и на станке модели СХГТ-3 в случаях с использованием охлаждения в виде эмульсии и без охлаждения. Измерения проводились тепловизором Testo 865.

При измерении температуры при гибке труб с раскатыванием с использованием тепловизора установлено, что применение масла наиболее эффективно, так как оно смазывает трущиеся поверхности трубы и раскатника, заметно уменьшая трение. Эмульсия обладает качествами, несколько уступающими маслу по смазывающему воздействию, но является более дешевым средством. Вода, обеспечивая наилучший теплоотвод, практически не снижает трения в зоне контакта инструмента и детали. Следовательно, при гибке труб с раскатыванием желательно использовать смазочно-охлаждающие жидкости на масляной основе.

Сравнив результаты двух методов измерения были следующие выводы:

– Без использования охлаждения температура в зоне раскатывания повышается не столь значительно в начале из-за перераспределения теплоты по толщине трубы;

– Температура на поверхности трубы заметно отличается от температуры на раскатном инструменте, что видно на снимках, с торца трубы из-за рассеяния теплоты по элементам технологической системы заготовки и распределения теплоты в окружающую среду;

– При значительной длительности гибки трубы в зоне раскатывания возрастает вероятность низкотемпературного отпуска инструмента, что требует обязательного использования высокоэффективных охлаждающих сред;

– При выходе на рабочий режим гибки температура достигает 130–140°С. Перепад температуры между раскатным инструментом и трубой 40°С. Применение в качестве охлаждения воды является достаточным, чтобы сохранить стойкость раскатного инструмента.

Использованные источники:

1. Пат. 818707 РФ. МКИ В 21 D 9/14. Способ гибки труб / С. Г. Лакирев, Я. М. Хилькевич; № 2713945/25; опубл. 07.04.81; Бюл. № 13.
2. Козлов, А. В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография / А. В. Козлов, А. В. Бобылев. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. — 169 с.

3. Халиулин, Е. В. Станок для гибки труб из титановых сплавов / Е. В. Халиулин, А. В. Козлов // «Наука ЮУрГУ»: материалы 69 научной конференции. — Сб. науч. тр. Челябинск: Изд. «ЮУрГУ», 2017. — с. 545–549.
4. Козлов А. В., Бобылев А. В. Изучение тепловых явлений при гибке труб с раскатыванием. Рубцовск: Рубцовский технол. ин-т, 2000. С. 118–120.
5. 5Новая технология холодной гибки труб / С.Г. Лакирев [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1997. № 6. С. 68–69.
6. Козлов А.В., Хилькевич Я.М. Оценка натягов и усилий при гибке труб с раскатыванием // Вестник ЮУрГУ. 2004. № 5 (34). С. 125–131.
7. Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Хилькевич Я.М. Опыт гибки тонкостенных труб в холодном состоянии // Технология машиностроения. 2008. № 10. С. 21–22.
8. Козлов, А.В., Чуманов И.В., Бобылев А.В. Изучение влияния холодной гибки труб с раскатыванием на структуру и свойства металла // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. № 6. 33–35.
9. Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Хилькевич Я.М. Напряженное состояние в трубе при ее гибке с раскатыванием n парами близко расположенных деформирующих элементов // Вестник машиностроения. 2009. № 8. С. 67–70.
10. Козлов А.В., Шеркунов В.Г. Компьютерное моделирование процесса гибки труб с раскатыванием // Известия ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. Вып. 4. С. 28–33.
11. Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Хилькевич Я.М. Механизмы снижения усилий гибки труб при их раскатывании с большими натягами // Вестник МТГУ им. Г.И. Носова. 2009№ 4. С. 36–39.
12. Козлов А.В. Разработка оборудования для холодной гибки труб с раскатыванием // Вестник МТГУ им. Г.И. Носова. 2010. № 1. С 34–36.
13. Козлов А.В., Бобылев А.В., Максимов С.П. Изучение тепловых явлений при гибке труб с раскатыванием. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. – Т.16, №3. – С.87-97.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА В СТАЦИОНАРНОМ СЛУЧАЕ

Опрышко О.В.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
OpryshkoOV@gmail.com

В данной работе используется математическая модель – система уравнений газовой динамики в условиях действия сил тяжести и Кориолиса, представляющая собой квазилинейную систему дифференциальных уравнений с частными производными гиперболического типа. В рамках этой модели ставится одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными данными, рассматривается стационарный случай.

Ключевые слова: Математическое моделирование, система уравнений газовой динамики, система дифференциальных уравнений с частными производными, задача Коши.

NUMERICAL SIMULATION OF THE BOTTOM PARTS OF A TORNADO AND A TROPICAL CYCLONE IN THE STATIONARY CASE

Opryshko O.V.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region
OpryshkoOV@gmail.com

In this work, a mathematical model is used - a system of equations of gas dynamics under the action of gravity and Coriolis, which is a quasi-linear system of partial differential equations of hyperbolic type. Within the framework of this model, one specific characteristic Cauchy problem with initial data is posed, and a stationary case is considered.

Keywords: Mathematical modeling, system of equations of gas dynamics, system of differential equations with partial derivatives, Cauchy problem.

В работе используется математическая модель – система уравнений газовой динамики в условиях действия сил тяжести и Кориолиса, представляющая собой квазилинейную систему дифференциальных уравнений с частными производными гиперболического типа. В рамках этой модели ставится одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными данными, заданными на горизонтальной плоскости $z = 0$, являющаяся контактной характеристикой кратности два [1]. Рассматривается стационарный случай. Доказываются теоремы о необходимых и достаточных условиях разрешимости поставленной задачи. Полученное решение представимо в виде бесконечно сходящегося ряда в окрестности плоскости $z = 0$. Первые коэффициенты ряда определяются из модели для радиальных течений. Последующие коэффициенты определяются с помощью разработанного математического метода моделирования газодинамических параметров для стационарного придонного течения газа.

Разработан численный метод моделирования придонной части восходящего закрученного потока. Определяются газодинамические параметры потока [2], в следствии этого численно рассчитывается кинетическая энергия [3] различных классов торнадо, данные которых приведены в таблице Фудзиты [4].

Проведен анализ полученных результатов исследования и сделаны соответствующие выводы.

Использованные источники:

1. Баутин С. П., Обухов А. Г., Крутова И. Ю. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков: монография. Екатеринбург: УрГУПС, 2020. 399 с.
2. Опрышко О.В. Расчёт параметров специальных трёхмерных стационарных потоков // Математические структуры и моделирование. 2018, №3(47) С. 45 - 60.
3. Крутова И.Ю., Опрышко О.В. Расчет кинетической энергии течений в придонной части торнадо и тропического циклона. //Препринт. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ. 2018. 45 с.
4. Tatom F. B. The transfer of energy from tornado into the ground Seismological / F. B. Tatom, S. J. Witton // Research Letter. – 2001. – V.72, № 1. – P. 12-21.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ ПУТЁМ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА

Орлова Н.Ю., Пильщиков А.А., Ежов Р.А., Мирошкин З.К.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Челябинская обл.

В работе представлены результаты изучения оптимизации геометрии деталей, выполненные с помощью топологического дизайна. Целью нашей работы была оптимизация геометрии деталей.

Ключевые слова: Топологический дизайн, оптимизация, SLM технология, оптимизация массы и объёма, аддитивные технологии.

GEOMETRY OPTIMIZATION OF PARTS BY TOPOLOGICAL DESIGN

Orlova N.Yu., Pilshchikov A.A., Ezhov R.A., Miroshkin Z.K.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk region

The paper presents the results of studying the optimization of the geometry of parts, performed using topological design. The aim of our work was to optimize the geometry of the parts.

Key words: Topological design, optimization, SLM technology, mass and volume optimization, additive technologies.

С появлением новых технологий производства, возникает необходимость их глубокого изучения. Одним из самых передовых методов производства деталей являются аддитивные технологии, позволяющие производить изделия с геометрией, недоступной для изготовления другими способами.

Аддитивные технологии позволяют расширить границы возможных форм изготавливаемой продукции. Однако недостаточная изученность аддитивных технологий накладывает ряд ограничений.

С целью более глубокого изучения этого инновационного метода, в данной работе мы рассматриваем один из вариантов оптимизации геометрии детали, путём топологического дизайна.

Для получения результатов был проведён анализ геометрии трёх деталей с последующей оптимизацией, при помощи программы “ANSYS DISCOVERY LIVE”.

В результате проведённой работы в программе, мы провели топологическую оптимизацию трёх деталей, причём прочностные характеристики и устойчивость к физическим нагрузкам осталось неизменной.

Рисунок 1 – Деталь до оптимизации (слева), деталь, оптимизированная с помощью топологического дизайна (справа)

Таким образом, на основании исследований мы можем предположить, что использование топологического дизайна значительно уменьшает массу конструкции, что положительно сказывается на уменьшении количества используемого сырья, и, следовательно, улучшается экономический эффект использования аддитивных технологий.

Использованные источники:

1. Аддитивные технологии в машиностроении, Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М., 2015 https://obuchalka.org/20190816112639/additivnie-tehnologii-v-mashinostroenii-zlenko-m-a-nagaicev-m-v-dovbish-v-m-2015.html
2. Louvis E. et. Al. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Ma-terials Processing Technology. Volume 211, Issue 2, 1 February 2011, Pages 275–284. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom.
3. Yasa E. , Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management 6 (2011) 4, 259-270, ISSN 1854-6250 Scientific paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4_259-270.pdf

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ. ПУТЬ К РЕАЛЬНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Орлова Н.Ю.
СФТИ НИЯУ МИФИ, г.Снежинск
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.

В работе представлены разработанные стратегии: отбора деталей, изготовление которых эффективно с использованием аддитивных технологий; подготовки деталей/узлов для изготовления с использованием аддитивных технологий; выбора эффективной аддитивной технологии в зависимости от решаемой задачи.

Ключевые слова: инновации, аддитивные технологии, диаграмма Исикавы, SLM технология, SLS технология, SLA технология FDM технология, DMD технология.

TECHNICAL INNOVATION. THE PATH TO REAL PRODUCTION

Orlova N.Yu.
SPTI NRNU MEPhI, Snezhinsk
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region

The paper presents the developed strategies: selection of parts, the manufacture of which is effective using additive technologies; preparation of parts/assemblies for manufacturing using additive technologies; choosing an effective additive technology depending on the problem being solved.

Key words: innovations, additive technologies, Ishikawa diagram, SLM technology, SLS technology, SLA technology FDM technology, DMD technology.

Чтобы предприятие было коммерчески успешным необходимо повышать его эффективность. Это может быть достигнуто в результате внедрения инноваций. По глубине вносимых изменений инновации принято разделять на модификационные, улучшающие и базовые. Аддитивные технологии (АТ) относятся к базовым инновациям. Аддитивные технологии (Additive Manufacturing; от англ. add — добавлять) — метод создания трехмерных объектов путем послойного добавления материала.

Грамотное внедрение АТ принесёт предприятию большие конкурентные преимущества. Сложность заключается в оптимизации выбора наиболее эффективной, для решения поставленной задачи аддитивной технологии. Для чего необходимо решить следующие задачи:

- разработать стратегию отбора деталей, изготовление которых эффективно с использованием аддитивных технологий;
- разработать стратегию подготовки деталей/узлов для изготовления с использованием аддитивных технологий;
- разработать стратегию выбора эффективной аддитивной технологии в зависимости от решаемой задачи.

При этом необходимо иметь ввиду, что специалистов, знающих АТ недостаточно, т.е. при разработке стратегии необходимо основываться на знаниях широкого круга конструкторов и технологов, знающих традиционные «вычитающие» технологии. Для разработки стратегии отбора деталей необходимо определить влияющие факторы и методы их

оценки. Для систематизации они были сгруппированы по стадиям, которые проходит изделие от идеи до готового продукта: исходные данные, конструкторские решения, технологические факторы, логистические факторы, факторы анализа. Для оценки качества процессов и объектов можно использовать: карта Шухарта, диаграмма Паретто, гистограммы, диаграмма рассеяния, но они только констатируют какие-либо отклонения и мало пригодны для выявления влияния. Диаграмма Исикавы, позволяет выявить и систематизировать влияющие факторы. Стратегия определения деталей изготовление которых эффективно с использованием АТ приведена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Стратегия выбора детали

Уровень влияния факторов определён на основе Диаграммы Исикавы (рисунок2).

Рисунок 2 – Диаграмма Исикавы для выбора детали изготавливаемой по АТ

На основе чего разработана стратегия подготовки деталей/узлов для изготовления АТ (рисунок 3)

Рисунок 3 - Стратегия подготовки деталей/узлов для изготовления с использованием аддитивных технологий

Конечным этапом является разработка стратегии выбора наиболее эффективной АТ (рисунок 4).

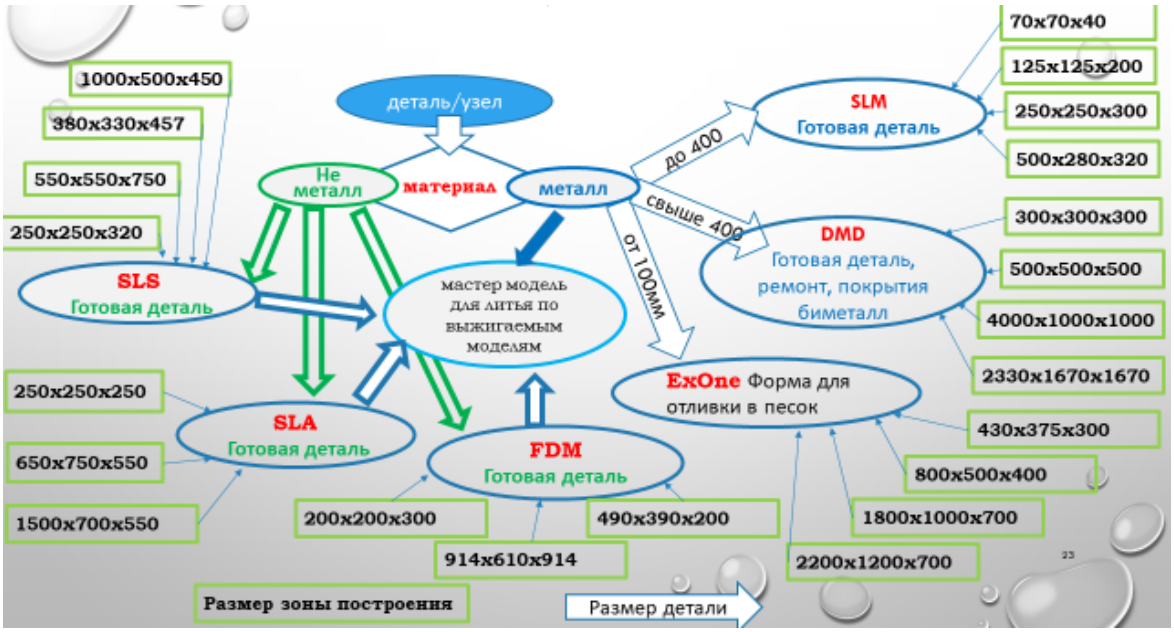


Рисунок 4 - Стратегия выбора аддитивной технологии и оборудования по типу решаемой задачи, размера и материала детали

Таким образом используя разработанные стратегии можно достаточно чётко выявить детали/узлы при изготовлении которых использование аддитивных технологий может принести наибольший эффект. При этом данные работы могут проводится конструкторами и технологами не являющимися специалистами в области аддитивных технологий, что особенно важно, т.к. таких специалистов в настоящее время крайне недостаточно.

Использованные источники:

1. Аддитивные технологии в машиностроении, Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М., 2015 https://obuchalka.org/20190816112639/additivnie-tehnologii-v-mashinostroenii-zlenko-m-a-nagaicev-m-v-dovbish-v-m-2015.html

2. Louvis E. et. Al. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Ma-terials Processing Technology. Volume 211, Issue 2, 1 February 2011, Pages 275–284. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom.
3. Yasa E. , Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management 6 (2011) 4, 259-270, ISSN 1854-6250 Scientific paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4_259-270.pdf

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ КОЛЕС НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПНЕВМОВЕЗДЕХОДОВ

Паршукова Н.Ю.[1], Шишкин Н.Я.[1], Лушина Ю.Ю.[2]
[1]ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
[2]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.
p.i.e@yandex.ru

Рассмотрены разработка и расчет специальных колес низкого давления (пневматиков), позволяющих увеличить дорожный просвет и существенно улучшить износостойкость и проходимость по мягким грунтам пневмовездеходов. Проведены соответствующие расчеты в программе конечно-элементного анализа.

Ключевые слова: пневмовездеходы, проходимость, пневматики, кордовые материалы, численный расчет, расчет в программе конечно-элементного анализа.

DEVELOPMENT AND CALCULATION OF LOW-PRESSURE WHEELS OF PNEUMATIC ATVS

N.Yu.Parshukova[1], N.Ya.Shishkin[1], Yu.Yu.Lushina[2]
[1]Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI
[2]Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Reseach Institute of Technical Physics
p.i.e@yandex.ru

The development and calculation of special low-pressure wheels (pneumatics) are considered, allowing to increase the ground clearance and to improve significantly the wear resistance and cross-country ability on soft soils of pneumatic ATVs. The corresponding calculations were carried out using the program of finite element analysis.

Key words: pneumatic ATVs, cross-country ability, pneumatics, cord materials, numerical calculation, calculation in the program of finite element analysis.

При создании самоходных машин СМ и снегоболотохода основными задачами являлись [1,2]: снижение массы, уменьшение габаритов и повышение проходимости в условиях сложного рельефа. Однако при эксплуатации было выявлено, что установленные колеса не обеспечивают необходимый дорожный просвет (машина СМ) и имеют недостаточную прочность и износостойкость (снегоболотоход). Для устранения выявленных недостатков были разработаны колеса низкого давления (пневматики).

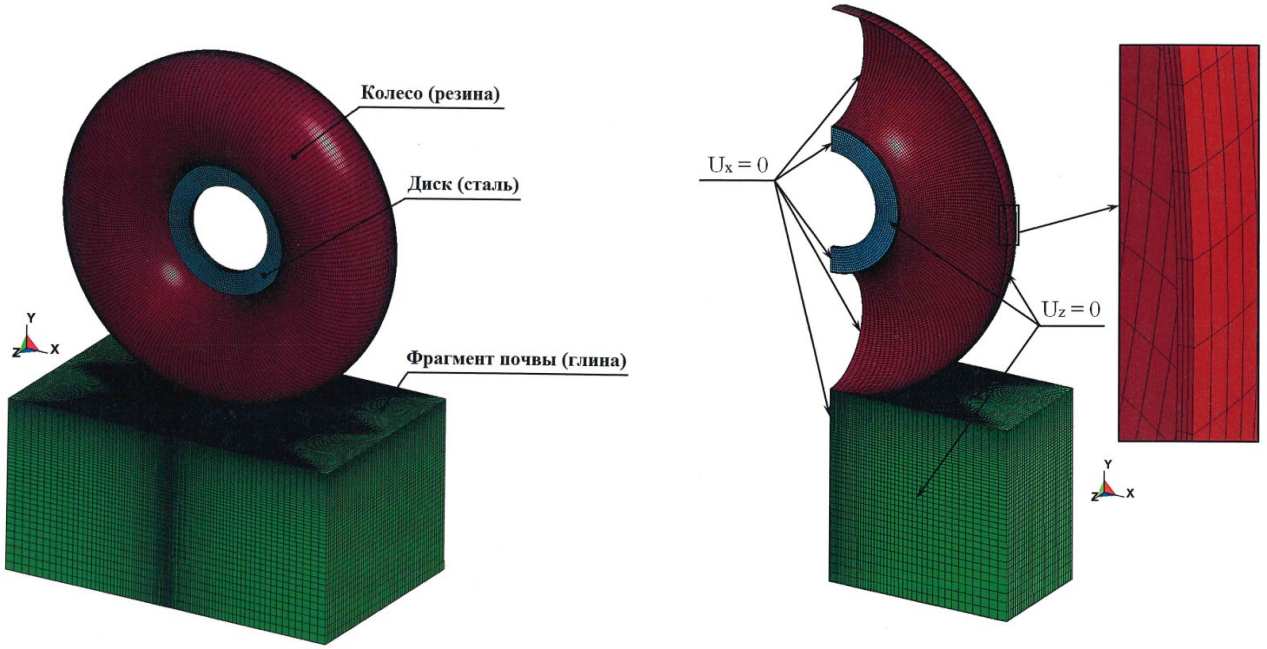
Колеса низкого давления изготовлены из износостойкого материала - резины, основой которой является синтетический каучук (СК), путем удаления лишних слоев резины (боковины, плечевой зоны, протектора) и части слоев корда с наружной поверхности покрышки, благодаря чему масса готового пневматика составила 29 килограмм. При снятии наружных слоёв резины с покрышки была оставлена часть протектора, что позволило обеспечить повышение проходимости и износостойкости. Размеры колес составили – ширина 350 мм, диаметр 1300 мм.

Расчет колес при движении по слабонесущим грунтам проводился по методике [3]. При взаимодействии пневматиков с грунтами важно выделить три основных случая: когда нормальная деформация колеса мала по сравнению с деформацией грунта, соизмерима с деформацией грунта и больше деформации грунта. Движение машин на шинах низкого давления наиболее точно соответствует первому и второму случаям. Был выполнен расчет

максимальной деформации пневматической шины совместно с деформацией мягкого грунта, которая составила 74 мм, что говорит о хорошей проходимости снегоболотохода.

Проведены лабораторные испытания кордового материала, применяемого для изготовления пневматиков, на испытательной машине МИМ-09ЛР-010. Определены предел прочности $\sigma_B = 26,34$ МПа и условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 15,08$ МПа.

Для проведения численных расчетов была разработана конечно-элементная модель колеса машины большего диаметра (рисунок 1). Проведены соответствующие расчеты в программе конечно-элементного анализа [4].



а б

Рисунок 1 – Конечно-элементная модель колеса: а - полная модель; б - четверть модели с граничными условиями.

В модели приняты допущения:

- поскольку колеса является симметричной конструкцией, для проведения расчетов построена четверть модели (рисунок 1, а) с заданием ограничений перемещений узлов, лежащих в плоскости YOZ, по оси X и узлов, лежащих в плоскости XOY, по оси Z;
- корпус машины не моделировался, его масса учтена при моделировании стального диска путем задания повышенной плотности его материалу;
- болотистая почва моделировалась фрагментом параллелепипеда из материала глины с механическими характеристиками: плотность ρ=0,002 г/мм^3, модуль Юнга E=50 МПа, коэффициент Пуассона =0,4.

В конечно-элементной модели заданы два нагружения: собственный вес машины с человеком – 300 Н; внутреннее давление – 20000 Па (0,2 атм).

В результате действия веса машины и внутреннего давления в колесе наблюдается смещения его нижней части на 43 мм (рисунок 2). Площадь контакта с почвой составляет 54600 мм^2. Наибольшие напряжения возникают на наружной поверхности колеса в области соединения с диском и составляют 1,78 МПа (рисунок 3), что значительно меньше предела прочности на сжатие резины ($\sigma_{в\ сж}$ = 6 МПа). То есть прочность колеса обеспечивается минимальным коэффициентом запаса 3,4.

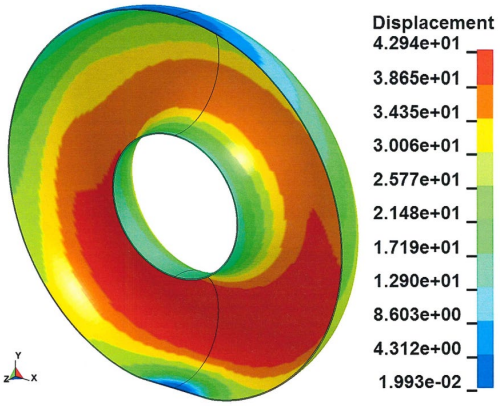


Рисунок 2 – Распределение смещений в колесе (показана половина конструкции), мм

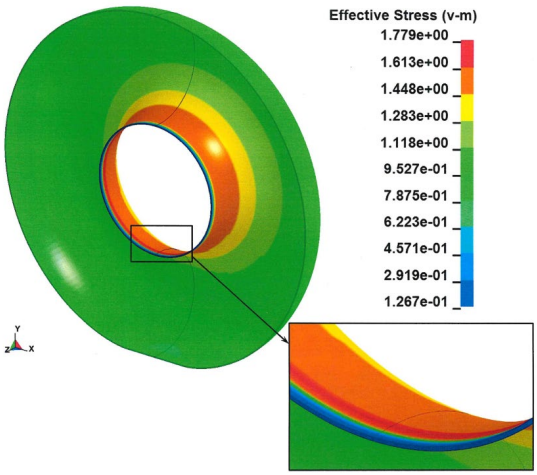


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений в колесе (показана половина конструкции), МПа

Таким образом, сконструированные пневматики для пневмовездеходов позволяют существенно улучшить износостойкость и проходимость по мягким грунтам.

Использованные источники:

1. Паршукова Н.Ю., Коробейников К.А., Шишкин Н.Я. Расчет и изготовление самодельного транспортного средства повышенной проходимости // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2019 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 18-20 декабря 2019г., Снежинск. М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – с.123-125.
2. Паршукова Н.Ю., Шишкин Н.Я., Коробейников К.А. Создание высокомобильного снегоболотохода // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2020 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 22-23 декабря 2020г., Снежинск. М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2020. – с.63-65.
3. Яблонев А.Л. Основы прогнозирования взаимодействия пневматического колесного хода с торфяной залежью // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. - Тверь: ТвГТУ, 2011.
4. LS-DYNA: Руководство пользователя/ перевод под ред. Б.Г. Рубцова. – Снежинск, 2000 г.

РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВНЕДРЕНИЕ КАРАКУРИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС В ВУЗЕ

Паршукова Н.Ю., Певнева Н.А.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
p.i.e@yandex.ru, sfti-nauka@mail.ru

Рассматривается возможность использования учебно-практической лаборатории по погружению в производственную деятельность «Инженерное мышление. Каракури» на базе вуза в образовательной деятельности и профориентационной работе.

Ключевые слова: Инженерное мышление, каракури, профессиональные пробы, простые механизмы.

DEVELOPMENT OF ENGINEERING THINKING THROUGH THE INTRODUCTION OF KARAKURI IN THE EDUCATIONAL PROCESS AT THE UNIVERSITY

Parshukova N.Yu., Pevneva N.A.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region
p.i.e@yandex.ru, sfti-nauka@mail.ru

The article reviews possibility of using an educational and practical laboratory for immersion in production activities “Engineering thinking. Karakuri" on the basis of the university in educational activities and career guidance.

Key words: Engineering thinking, karakuri, professional tests, simple mechanisms.

Актуальность создания учебно-практической лаборатории по погружению в производственную деятельность «Инженерное мышление. Каракури» в СФТИ НИЯУ МИФИ вызвана необходимостью развития ключевых компетенций современного инженера у студентов и обучающихся физико-технической школы - совместного проекта предприятия Росатома ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ и вуза. Компетенция «Инженерное мышление. Каракури» входит в перечень востребованных компетенций ГК «Росатом», центром экспертизы по внедрению каракури в атомной отрасли выступает Корпоративная академия «Росатома».

В рамках работы по созданию лаборатории студентами и обучающимися физико-технической школы под руководством преподавателей кафедры общетехнических дисциплин СФТИ НИЯУ МИФИ на практике изучены законы механики, базовые механизмы каракури, виды конструкторской документации, основы стандартизации, черчения и чтения чертежей, охраны труда и безопасности, осуществлено решение прикладных задач с использованием устройств каракури, изготовлены действующие модели и методические пособия.

Поскольку занятия по компетенции «Инженерное мышление» помогают развивать любовь к таким предметам, как математика, физика, технология, 3D-моделирование, а также понимание, зачем эти предметы нужны, данная компетенция внесена в перечень компетенций, знакомство с которыми проводится в рамках Всероссийских профессиональных проб «Кто ты в атомной отрасли?» на базе СФТИ НИЯУ МИФИ (участники – до 300 человек в год).

План проведения профпробы по компетенции «Инженерное мышление» включает знакомство с историей каракури и примерами использования механизмов для оптимизации

процессов на предприятиях ГК Росатом, инструктаж по технике безопасности при работе с ручным инструментом, решение практической задачи с использованием простых механизмов, а также испытания экспериментальных образцов на прочность (ударную вязкость, растяжение-сжатие и т.д.). Длительность профпробы – 2 академических часа, наставники – преподаватели кафедры общетехнических дисциплин СФТИ НИЯУ МИФИ, студенты и обучающиеся физико-технической школы вуза.

Создание специализированной лаборатории по данной компетенции в СФТИ НИЯУ МИФИ позволяет обучающимся не только познакомиться с данной компетенцией, но и развивать навыки оптимизации процессов и решения реальных производственных задач.

Использованные источники:

1. Каракури в Росатоме. URL: https://rosatom-academy.ru/documents/828/Каракури._Истории_оптимизации.pdf?ysclid=lbkjmt1f4h577621685 (дата обращения: 10.12.2022) – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
2. Атомщиков готовят к внедрению каракури. URL: https://strana-rosatom.ru/2022/07/14/44934/?ysclid=lbkjsaz4p2736252479 (дата обращения: 10.12.2022) – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
3. В СФТИ НИЯУ МИФИ прошел Первый слёт кадетского уральского атомного образовательного кластера. URL: https://www.sphti.ru/в-сфти-нияу-мифи-прошел-первый-слёт-кад/ (дата обращения: 10.12.2022) – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ЧАСТОТУ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ НАНОЛЕНТ

Петрова Ю.А., Садыков Н.Р., Скрябин С.Н.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
petrovayulia02@mail.ru

В нашей работе исследованы механические колебания наноленты крессельного типа с учетом поверхностного потенциала. Мы получили свободную энергию с учетом свободной энергии упругой деформации и квантовой поверхностной энергии, определили длину волны и скорость распространения продольной волны. Вычислили резонансную частоту крутильных колебаний в наноленте (стоячие волны).

Ключевые слова: поверхностный потенциал, наноленты крессельного типа, свободная энергия упругой деформации, квантовая поверхностная энергия, деформация кручения, угол кручения, тензор деформации, тензор напряжения, модуль Юнга, крутильная жесткость.

INFLUENCE OF THE SURFACE POTENTIAL ON THE FREQUENCY OF TORSIONAL VIBRATIONS OF THIN NANORIBBONS

Petrova Yu.A., Sadykov N.R., Skryabin S.N.
Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University "MEPhI", Chelyabinsk Region
petrovayulia02@mail.ru

In our work we investigated the mechanical vibrations of nanoribbons of the "armchair-edge" type, based on the surface potential. We obtained the free energy based on the elastic free energy of elastic deformation and the quantum surface energy, determined the wavelength and speed of propagation of the longitudinal wave. We calculated the resonant frequency of torsional vibratons in the nanoribbon (standing waves).

Key words: the surface potential, nanoribbons of the "armchair-edge" type, the elastic free energy of elastic deformation, the quantum surface energy, a torsional deformation, the torsion angle, the strain tensor, the stress tensor, Young's modulus, torsional rigidity.

Деформация кручения тонких стержней

Мы применили к нанолентам теорию деформации тонких стержней прямоугольного сечения [1]. Деформация кручения заключается в том, что в стержне, остающемся при этом прямым, каждое поперечное сечение поворачивается относительно нижележащих на угол $d\varphi = \tau dz$, где τ - угол кручения. Сама деформация кручения, т.е. относительные смещения соседних частей стержня, предполагаются малыми. Условием этого является малость относительного поворота сечений, удаленных вдоль длины стержня на расстояния порядка его поперечных размеров R, т. е. $\tau R \ll 1$.

Компоненты u_x, u_y вектора смещения, тензора деформации u_{ik} и напряжений σ_{ij}

$$u_x = -\tau zy, \quad u_y = \tau zx, \qquad u_z = \tau\psi(x,y), \qquad u_{ik} = \frac{1}{2}(\partial u_i/\partial x_k + \partial u_k/\partial x_i), \tag{1}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\sigma}\left(u_{ij} - \frac{1}{3}u_{ll}\delta_{ik}\right) + u_{ll}\delta_{ik}K = \frac{E}{1+\sigma}\left(u_{ij} + \frac{\sigma}{1-2\sigma}u_{ll}\delta_{ik}\right), \tag{2}$$

где $\psi(x,y)$ – функция кручения, $u_{ll} = 0$ –деформация чистого сдвига.

В случае тонкой пластины отличны от нуля будут компоненты σ_{xz}, σ_{yz}[1], которые могут быть выражены через вспомогательную функцию $\chi(x,y)$.

$$\sigma_{xz} = 2\mu\tau\frac{\partial\chi}{\partial y}, \qquad \sigma_{yz} = -2\mu\tau\frac{\partial\chi}{\partial x}, \tag{3}$$

где $\mu = E/[2(1+\sigma)]$ – модуль сдвига.

С учётом (3) получим уравнение для функции χ

$$\Delta\chi = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2. \tag{4}$$

Свободная энергия механических деформаций единицы объема скрученного стержня

$$F = \frac{\sigma_{iju_{ik}}}{2} = \frac{1}{2\mu}\left[(\sigma_{xz})^2 + \left(\sigma_{yz}\right)^2\right] = 2\mu\tau^2(\mathrm{grad}\chi)^2. \tag{5}$$

Исходя из крутильной жесткости стержня C определим энергию кручения (свободную энергию), отнесенную к единице длины стержня,

$$\int Fdf = C\tau^2/2, \qquad C = \int = 4\mu\int(grad\chi)^2 df = \frac{\mu Ha^3}{3} \tag{6}$$

Результаты расчетов.

В случае упругих деформаций свободная энергия наноленты в соответствии с (6) равна

$$\mathcal{F} = L\int Fdf = \frac{\mu LHa^3}{6}\tau^2 = \frac{E}{2(1+\sigma)}\tau^2\frac{LHa^3}{6} \approx 6{,}8 \text{ эВ} \tag{7}$$

где $\tau = \frac{2\pi}{L} = 5{,}1\times10^8$ м$^{-1}$ – угол кручения, $E = 1{,}04\times10^{12}$ Па – модуль Юнга, $\sigma = 0{,}139$ – коэффициент Пуассона, $H = mb\sqrt{3} \approx 1{,}23$ нм – ширина наноленты, $m = 5$ – период ячейки углерода в поперечном направлении, $b = 1{,}42\times10^{-10}$ м, $L = 10H$ –длина наноленты, $a = 0{,}154$ нм – толщина наноленты [2-4].

При $a = 0{,}284$ нм свободная энергия наноленты будет $\mathcal{F} \approx 42{,}9$ эВ.

Свободная энергия с учётом чисто квантовых эффектов определяется в соответствие с формулой (8)

$$\tilde{\mathcal{F}} = \tilde{F}L = \left[4HL/(3\sqrt{3}b^2)\right]\Delta\mathcal{E} \approx -10{,}4 \text{ эВ} \tag{8}$$

Из (8) видно, что свободная энергия наноленты, определяемая как сумма свободных энергий в случае упругих деформаций и с учётом геометрического потенциала [6,7], будет уменьшаться благодаря тому, что $\tilde{\mathcal{F}} < 0$.

Таким образом, при $a = 0{,}154$ нм следует $\left(\tilde{\mathcal{F}} + \mathcal{F}\right) < 0$, т.е. в соответствии с (7) и (11) $\left(C + C_{\mathrm{sp}}\right) < 0$, колебания будут затухающими. При $a = 0{,}284$ nm $\left(\tilde{\mathcal{F}} + \mathcal{F}\right) > 0$, т.е. в соответствии с (7) и (11) $\left(C + C_{\mathrm{sp}}\right) > 0$, колебания не будут затухать.

В нашей работе было получено уравнение для крутильных колебаний стержня

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = \frac{C}{\rho I}\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}, \tag{9}$$

где ρ – плотность материала стержня, I – момент инерции сечения стержня относительно центра инерции.

С учетом поверхностного потенциала уравнение для крутильных колебаний наноленты будет иметь вид

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = \frac{(C+C_{\mathrm{sp}})}{\rho I}\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}, \tag{10}$$

$$C = \frac{2\mathcal{F}}{L\tau^2} \approx 6{,}84\times10^{-28} \text{ Дж}\cdot\text{м}, \qquad \left(C + C_{sp}\right)/\mathrm{C} = 0{,}7, \tag{11}$$

где крутильная жесткость C вычислена для длины наноленты $a = 0{,}154$ нм, C_{sp}-величина, которая учитывает влияние поверхностного потенциала на частоту колебаний стержня.

Из (10) следует, что скорость распространения продольной волны равна

$$\upsilon = \left[\left(C + C_{\mathrm{sp}}\right)/\rho\cdot I\right]^{1/2} \tag{12}$$

В соответствие с формулой (13) скорость распространения продольной волны без учёта поверхностного потенциала составляет

$$\upsilon = [C/\rho\cdot I]^{1/2} \approx 2{,}61\times10^3 \text{ м/с} \tag{13}$$

и частота крутильных колебаний наноленты

$$\omega = \frac{\pi\upsilon}{\mathrm{L}}, \quad \omega \approx 6{,}67\times10^{11}, \tag{14}$$

что соответствует длине волны $\lambda \approx 3$ мм для электромагнитного излучения.

Заключение. Согласно (10) свободная энергия (6) геликоидальной наноленты, благодаря поверхностному потенциалу, изменяется на величину $\tilde{\mathcal{F}}$<0. Это приводит к изменению крутильной жесткости $(\mathrm{C} + C_{sp})$, частоты крутильных колебаний $(\omega_{sp} + \omega)$ и скорости распространения волн $(v_{sp} + v)$ в нановолокне.

В случае, когда толщина графена составляет приблизительно $a = 0{,}154$ нм $(a/b = 1{,}085)$, поверхностный потенциал приводит к изменению крутильной жесткости $(C + C_{\mathrm{sp}})$, скорости распространения волн $(v_{sp} + v)$ в наноленте и частоты крутильных колебаний в соответствие с (15)

$$(\mathrm{C} + C_{sp})/\mathrm{C} = 0{,}7,\ v_{sp}/v = \omega_{sp}/\omega = \left[(\mathrm{C} + C_{sp})/\mathrm{C}\right]^{1/2} = 0{,}84. \qquad (15)$$

Если бы величина $a/b = 0{,}73$, то частоты крутильных колебаний $(\omega_{sp} + \omega) = 0$ и скорость поверхностной $v_{sp} = 0$.

Использованные источники:

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика - Теория упругости, 4-е изд., испр. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 248 с. (т. VII).
2. Liu, F.; Ming, P.M.; Li, J. Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of graphene under tension. Phys. Rev. B 2007, 76, 064120.
3. Qiang Cao, Xiao Geng, Huaipeng Wang, Pengjie Wang, Aaron Liu, Yucheng Lan and Qing Peng, Crystals 2018, 8, 357; doi:10.3390/cryst8090357.
4. Kudin, K.N.; Scuseria, G.E.; Yakobson, B.I. C2f, BN, and C nanoshell elasticity from ab initio computations. Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64. P. 235406.
5. Садыков Н.Р., Петрова Ю.А., Храбров Р. С., Скрябин С. Н., Журнал физической химии, принята в печать, 2023, февраль.
6. Петрова Ю.А., Пилипенко И. А., Храбров Р. С., Скрябин С. Н., Садыков Н. Р. Влияние эффективного геометрического потенциала на величину скручиваемости геликоидальных нанолент - НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ – 2022.
7. Петрова Ю.А., Пилипенко И.А., Храбров Р.С., Скрябин С.Н., Садыков Н.Р. Влияние эффективного геометрического потенциала на величину скручиваемости геликоидальных нанолент - IX Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий».

ПОСТРОЕНИЕ АВТОМОДЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ИСТЕЧЕНИЕ ПОЛИТРОПНОГО ГАЗА В ВАКУУМ С КОСОЙ СТЕНКИ В НЕСОГЛАСОВАННОМ СЛУЧАЕ

Понькин Е.И.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
epnk@rambler.ru

Аннотация. В настоящей работе приведен результат построения и анализ аналитического решения задачи, описывающего разлет газа в вакуум на косой стенке в общем несогласованном случае. Решение задачи строится в виде рядов функций c, u и v по степеням ϑ, где ϑ – известная функция автомодельных переменных $\xi = x / t$, $\eta = y / t$. С этой целью построено аналитическое решение транспортного уравнения для коэффициента c_1 решения системы уравнений газовой динамики. В частном случае, когда $\gamma = 5/3$, для коэффициента c_1 аналитическое решение построено в явном виде. Полученное решение применено к описанию сжатия замкнутого объема, представляющего собой правильный треугольник $(\alpha = \pi / 3)$. Найдена особенность полученного решения, которая определяет характер течения в области двойной волны сжатия.

Ключевые слова: характеристическая задача Коши стандартного вида, транспортное уравнение, аналитическое решение, замкнутый призматический объем, система уравнений газовой динамики.

CONSTRUCTION OF A SELF-SIMULAR SOLUTION OF THE SYSTEM OF EQUATIONS OF GAS DYNAMICS DESCRIBING THE OUTFLOW OF A POLYTROPIC GAS INTO VACUUM FROM AN OBLIQUE WALL IN THE UNCONSISTENT CASE

Ponkin E.I.
Snezhinsk Engineering and Technological Institute of National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region

Abstract. In this paper, we present the result of constructing and analyzing the analytical resolution of the problem describing the expansion of gas into vacuum on an oblique wall, in general, agreed case. The solution of the problem is built in the form of series of functions c, u, and v according to ϑ powers , where ϑ is a known function of self-similar variables $\xi = x / t$, $\eta = y / t$. With this the purpose is to construct an analytical solution of the transport equation for the coefficient c_1 solution of the system of equations of gas dynamics. In the particular case when $\gamma = 5/3$, for the coefficient c_1 the analytical solution is constructed explicitly. Received the solution is applied to the description of the compression of a closed volume, which is a special the regular triangle $(\alpha = \pi / 3)$. A singularity of the obtained solution is found, which determines the nature of the flow in the region of the double compression wave.

Keywords: characteristic Cauchy problem of standard form, transport equation, analytical solution, closed prismatic volume, system of equations of gas dynamics

Начально-краевая задача (характеристическая задача Коши стандартного вида, далее ХЗК), описывающая при $t > 0$ истечение политропного газа в вакуум с косой стенки в несогласованном случае, имеет вид [1]:

$$\begin{cases} [B - f'(\xi)A]\mathbf{U}_{\vartheta} + A\mathbf{U}_{\xi} = 0, \\ \mathbf{U}\Big|_{\vartheta=0} = \mathbf{U}_{\mathbf{0}}, \\ v\Big|_{y=x\,\mathrm{tg}\,\alpha} = u\,\mathrm{tg}\,\alpha\Big|_{y=x\,\mathrm{tg}\,\alpha}. \end{cases} \tag{1}$$

где $\mathbf{U} = \left(c, u, v\right)^T$. Матрицы A и B соответственно равны:

$$A = \begin{pmatrix} u-\xi & \varkappa c & 0 \\ c/\varkappa & u-\xi & 0 \\ 0 & 0 & u-\xi \end{pmatrix},\ B = \begin{pmatrix} v-\vartheta-f\left(\xi\right) & 0 & \varkappa c \\ 0 & v-\vartheta-f\left(\xi\right) & 0 \\ c/\varkappa & 0 & v-\vartheta-f\left(\xi\right) \end{pmatrix}, \tag{2}$$

здесь функция $f\left(\xi\right)$ задает в пространстве переменных ξ, η звуковую характеристику $\left(\vartheta = 0\right)$, разделяющую плоское течение и течение типа двойной волны, $\varkappa = \dfrac{\gamma-1}{2}$.

Третье уравнение системы (1) задает условие непротекания на косой стенке.

Решение (1) строится в виде сходящегося ряда по степеням ϑ:

$$\mathbf{U}(\xi,\vartheta) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{U}_k(\xi)\frac{\vartheta^k}{k!};\ \mathbf{U}_k(\xi) = \frac{\partial^k \mathbf{U}}{\partial \vartheta^k}\bigg|_{\vartheta=0}. \tag{3}$$

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 $\vartheta = 0$.

Коэффициент ряда c_1 находят из решения транспортного уравнения, которое строится путем дифференцирования по ϑ системы из задачи (1) и подстановки в нее значения $\vartheta = 0$. С учетом полученных выражений для u_1, v_1 и условия разрешимости ХЗК стандартного вида, получается дифференциальное (транспортное) уравнение для неизвестной функции c_1. Начальное условие для транспортного уравнения строится из краевого условия задачи (1):

$$\begin{cases} c_1' - P(\xi)c_1 - Q(\xi)\cdot c_1^2 = 0, \\ c_1\Big|_{\xi=1} = \dfrac{2\varkappa}{\varkappa+1}\dfrac{\mathrm{tg}\,\alpha}{\mathrm{tg}^2\,\alpha+1}. \end{cases} \tag{4}$$

где $P\left(\xi\right) = \dfrac{1}{2c_0}\left[\dfrac{1}{R^2} - 1 - \dfrac{4}{\varkappa+1}\dfrac{1}{R^2+1}\right]$, $Q\left(\xi\right) = \dfrac{\varkappa+1}{4\varkappa}\dfrac{\left(1+R^2\right)^2}{c_0 R^3}$, а $R = \sqrt{\beta + c_0^{(1-\varkappa)/\varkappa}\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha - \beta\right)}$.

Аналитическое решение задачи (4) имеет вид:

$$c_1\left(\xi\right) = \frac{c_0^2+f^2}{c_0 f}\left(\frac{2\varkappa}{\varkappa+1}\right)^2\left[\widetilde{C}_1 c_0^{1/\varkappa} + \left(2\varkappa - 1 + \frac{f^2}{c_0^2} - \frac{\varkappa}{\varkappa+1}\frac{c_0^2}{f^2}\right) - \frac{\varkappa(2\varkappa+5)}{\varkappa+1}c_0^{1/\varkappa} I\right]^{-1}. \tag{5}$$

где $I = \displaystyle\int \frac{dz}{z^2\left(\beta + z^{1-\varkappa}\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha - \beta\right)\right)}$. Для случая водорода ($\gamma = 5/3$, $\varkappa = 1/3$)

выражение для функции $c_1\left(\xi\right)$ имеет вид:

$$c_1\left(\xi\right)=\frac{3+c_0^2\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha-2\right)}{\sqrt{2+c_0^2\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha-2\right)}}\times M^{-1} \tag{6}$$

Значение M равно:

$$M=-6c_0^3+2{,}25c_0^3\,\mathrm{tg}^2\,\alpha+\frac{3c_0^3}{\mathrm{tg}^2\,\alpha}+\frac{17\sqrt{2}}{8}c_0^3\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha-2\right)^{3/2}\mathrm{arctg}\sqrt{\frac{1}{2}\left(\mathrm{tg}^2-2\right)}+9\frac{1}{2}-$$
$$-\frac{1}{4}c_0^2\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha-2\right)-\frac{1}{2+c_0^2\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha-2\right)}-\frac{17\sqrt{2}}{8}c_0^3\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha-2\right)^{3/2}\mathrm{arctg}\frac{c_0}{\sqrt{2\,/\left(\mathrm{tg}^2\,\alpha-2\right)}}. \tag{7}$$

Применим полученное решение к описанию сжатия специального призматического объема, представляющего собой правильный треугольник, тогда $\alpha=\pi\,/\,3$, $\mathrm{tg}\,\alpha=\sqrt{3}$. Подставим данные значения в формулы (6) и (7), получим выражение для функции $c_1\left(\xi\right)$

$$c_1\left(\xi\right)=\frac{3+c_0^2}{\sqrt{2+c_0^2}}\times\left[9{,}5+3{,}5996c_0^3-0{,}25c_0^2-\frac{1}{c_0^2+2}-\frac{17\sqrt{2}}{8}c_0^3\mathrm{arctg}\frac{\sqrt{2}}{2}c_0\right]^{-1}. \tag{8}$$

Исследуем полученное выражение для функции c_1. Найдем нули функции, стоящей в знаменатели дроби. Так как справедливо неравенство

$$c_0^2+2>0$$

при любых c_0, тогда

$$9{,}5+3{,}5996c_0^3-0{,}25c_0^2-\frac{1}{c_0^2+2}-\frac{17\sqrt{2}}{8}c_0^3\mathrm{arctg}\frac{\sqrt{2}}{2}c_0=0. \tag{9}$$

При $c_0\geq 1$ корнем (9) будет значение $c_0^*=3{,}9564$, $\left(\xi_*=12{,}8257\right)$, значит при $c_0\to c_0^*$ значение $c_1\to\infty$. Так как c_1 по определению равно $c_1=\left.\frac{\partial c}{\partial\vartheta}\right|_{\vartheta=0}$, следовательно, в точке ξ_* при сжатии призматического объема возникает градиентная катастрофа, что приводит к образованию сильного разрыва в самом течении, и как следствие формированию ударной волны сжатия. Необходимо отметить, что в общем решении задачи (1) других особенностей не будет, т.к. все последующие ДУ для коэффициентов c_k при $k\geq 2$ линейные в отличие от уравнения (4), которое нелинейное.

Использованные источники:

1. Баутин С.П., Понькин Е.И. Автомодельные решения задачи об истечении политропного газа в вакуум с косой стенки. // Прикладная механика и техническая физика. 2021, т. 62, № 1. С.32–40.
2. Понькин Е. И. Характеристическая задача Коши стандартного вида для описания истечения политропного газа в вакуум с косой стенки// Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки., 2022. Т.26, №2. С. 322-338.

ЗНАЧИМОСТЬ КУРСА «ЯДЕРНОЕ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЕ» В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ БАЗОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Садовский А.А.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
a.a.sadovskiy@gmail.com

Приводится мотивация необходимости включения данного курса в учебные планы специальностей. Рассматриваются организационные и учебно-методические аспекты в постановке и преподавании курса. Обозначена актуальность курса в понимании проблем современности.

Ключевые слова: Учебный курс, ядерное нераспространение.

THE SIGNIFICANCE OF THE COURSE "NUCLEAR NON-PROLIFERATION" IN THE TRAINING OF SPECIALISTS FOR THE BASIC ENTERPRISE

Sadovsky A.A.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region
a.a.sadovskiy@gmail.com

The motivation for the need to include this course in the curricula of specialties is given. Organizational and educational-methodical aspects in setting and teaching the course are considered. The relevance of the course in understanding the problems of modernity is indicated.

Key words: Training course, nuclear non-proliferation.

После окончания второй мировой войны вместо ожидаемого мира развернулась ядерная гонка вооружения. Лидерами в этой гонке стали США и СССР, а за ними последовали Великобритания, Франция и Китай. Начали развивать ядерные программы и другие страны. Однако в 1960-х годах в мире складывается реальное понимание угрозы применения ядерного оружия, что привело к выработке и подписанию Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО). Несмотря на все сложности и противоречия международных отношений, режим ядерного нераспространения и до настоящего времени обеспечивает правовую основу международной безопасности.

Тема ядерного нераспространения и возможности применения ядерного оружия становится особенно «горячей» в ходе противостояния коллективного Запада и России, в том числе связанным с ситуацией на Украине. Напряженность политической ситуации из-за проблем ядерного нераспространения наблюдается на Ближнем Востоке и в Юго-Восточной Азии. В условиях роста численности населения Земли (в настоящее время более 8 млрд человек) и ограниченности природных ресурсов доля атомной энергетики в энергообеспечении будет возрастать. Так доля атомных станцией в электроэнергетике России в 2022 году достигла 20% в общей выработке электроэнергии. Госкорпорация Росатом возводит атомные электростанции и поставляет ядерное топливо и в зарубежные страны, что требуют усиления безопасности ядерных объектов. К настоящему времени появилась необходимость не только говорить о проблеме ядерного нераспространения, но и обучать специалистов техническим и политическим аспектам, обеспечивающим режим нераспространения.

Первым из вузов России, который разработал и ввёл в учебный план курсы по нераспространению, явился Московский инженерно-физический институт (МИФИ). За ним последовали Московский государственный институт международных отношений (МГИМО) и Томский государственный политехнический университет (ТПУ). Среди вузов Росатома впервые курс «Ядерное нераспространение» был разработан и включен в учебный план осеннего семестра 2003-2004 учебного года в Снежинской государственной физико-технической академии (СГФТА). Данный проект выполнялся в рамках договора о сотрудничестве между СГФТА и Центром изучения проблем нераспространения Монтерейского института международных исследований (США). Курс «Ядерное нераспространение» предназначен для преподавания студентам старших курсов технических специальностей в СГФТА, которые по окончанию вуза работают на базовом предприятии из структуры Росатома.

Основной направленностью данного курса является введение в международно-правовые, политические, технические, экономические и другие аспекты ядерного нераспространения и безопасности ядерных материалов.

Учебная программа курса состоит из 5-ти основных разделов:

- Международно-правовые аспекты нераспространения;
- Физическая защита, учет и контроль ядерных материалов;
- Экспортный контроль;
- Ренессанс атомной энергетики и проблемы нераспространения;
- Противодействие терроризму.

Лекционный материал занимает 16 часов, практические занятия – 16 часов. Итоговый контроль проходит в виде зачета или экзамена, в зависимости от учебного плана специальности.

Основой для построения курса явилось учебное пособие (1). При доработке курса в разделе «Международно-правовые аспекты нераспространения» более подробно рассмотрена тема совершенствования ядерного вооружения малой мощности и проблемы «вертикального распространения». В этом же разделе добавлен анализ перспектив Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний и проблемы контроля выполнения его условий.

В разделе «Физическая защита, учёт и контроль ядерных материалов» вносятся изменения, нашедшие отражение в международной нормативной базе и нормативных документах Росатома.

В разделе «Экспортный контроль» помимо контроля за ядерными материалами особое внимание уделяется контролю за продукцией двойного назначения. Используются методические материалы по обучению работников таможенных служб.

Раздел «Ренессанс атомной энергетики и проблемы нераспространения» отражает тенденции и проблемы развития атомной энергетики. Уделяется особое внимание обеспечению безопасности ядерных объектов и обращению с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО).

В разделе «Противодействие терроризму» рассматриваются различные сценарии применения оружия массового уничтожения и возможные последствия, факты незаконного оборота ядерных материалов, нетрадиционные вызовы ядерному нераспространению.

Для оценки уровня знаний студентов и возможной корректировки излагаемого материала проводится входное анкетирование. Лекционный материал подготовлен в виде презентаций, а некоторые темы сопровождаются видеофильмами. На практических занятиях обсуждаются актуальные проблемы ядерного нераспространения. В качестве домашнего задания студенты готовят реферат на заданную тему и по нему доклад с презентацией.

Интерес вызывают вопросы разработки и совершенствования ядерного оружия в условиях Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), особенности компьютерного моделирования.

Опыт проведения курса «Ядерное нераспространение», результаты опроса студентов и преподавателей показали его важность, значимость и необходимость при подготовке специалистов в области ядерных технологий.

Использованные источники:

1. Ядерное нераспространение: учебное пособие для студентов / В.А. Орлов, И.А. Ахтамзян, Р.М. Тимербаев, Д.Г. Евстафьев, Н.Н. Соков; под общей редакцией В.А. Орлова. 2-е издание, переработанное и расширенное. - Москва: ПИР-Центр, 2002. – 528 с.
2. Ядерное нераспространение: учебное пособие / Г.М. Пшакин, Н.И. Гераскин, В.М. Мурогов (и др.). 2-е издание, исправленное и дополненное. Москва: МИФИ, 2006. – 304 с.
3. Садовский, А.А. Культура техногенной безопасности в атомной отрасли: сборник материалов / А.А. Садовский. – Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 140 с.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ВОЛЬФРАМА, НИКЕЛЯ И МЕДИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Середкин Н.Н.[1,2,3], Хищенко К.В.[1,3,4,5]
[1]*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва*
[2]*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*
[3]*ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Московская обл.*
[4]*ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», г. Долгопрудный, Московская обл.*
[5]*ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, Челябинская обл.*
nikser12@yandex.ru

Предложена модель термодинамики сплавов на основе уравнений состояния компонентов с учетом их массовых долей. Проведены расчеты термодинамических характеристик сплава вольфрама, никеля и меди при высоких давлениях и температурах. Дано сравнение расчетных ударных адиабат сплава по предложенному уравнению состояния и по принципу аддитивности ударных адиабат компонентов.

Ключевые слова: уравнение состояния смеси, ударные адиабаты, аддитивное приближение, сплав вольфрама с никелем и медью.

EQUATION OF STATE OF THE ALLOY OF TUNGSTEN, NICKEL AND COPPER AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

Seredkin N.N.[1,2,3], Khishchenko K.V.[1,3,4,5]
[1]*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow*
[3]*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow Region*
[4]*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region*
[5]*South Ural State University, Chelyabinsk, Chelyabinsk Region*
nikser12@yandex.ru

A model of the thermodynamics of alloys is proposed based on the equations of state of the components, taking into account their mass fractions. Calculations of thermodynamic characteristics of an alloy of tungsten, nickel and copper at high pressures and temperatures have been carried out. A comparison is made of the calculated shock adiabats of the alloy according to the proposed equation of state and according to the principle of additivity of the shock adiabats of the components.

Key words: mixture equation of state, shock adiabats, additive approximation, tungsten–nickel–copper alloy.

Описание термодинамических свойств различных материалов требуется при решении многих задач физики и энергетики, связанных с численным моделированием интенсивных импульсных процессов. Сплавы представляют собой широкий класс веществ, свойства которых зависят, в частности, от свойств и массовых долей компонентов.

В этой работе предлагается подход к построению уравнения состояния сплава, основанный на предположении об установлении термодинамического равновесия между

компонентами. Тогда, если известны уравнения состояния компонентов, то удельный объем (V_{1N}) и удельная внутренняя энергия сплава (E_{1N}) выражаются в виде сумм

$$V_{1N}(P,T)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_i V_i(P,T),\ E_{1N}(P,T)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_i E_i(P,T),$$

где P – давление; T – температура; N – количество компонентов; α_i – массовая доля i-того компонента; V_i – удельный объем i-того компонента; E_i – удельная внутренняя энергия i-того компонента.

В рамках этого подхода были проведены расчеты термодинамических характеристик сплава вольфрама, никеля и меди (ВНМ-3-2) в условиях нагружения в ударных волнах. Сопоставление расчетной ударной адиабаты сплава ВНМ-3-2 с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов [1] показывает, что построенная модель хорошо описывает свойства этого материала во всем исследованном диапазоне давлений.

Также был проведен расчет ударной адиабаты этого сплава в предположении аддитивности удельных объемов на ударных адиабатах вольфрама, никеля и меди при заданном давлении [2]. Полученная в этом предположении расчетная кривая также хорошо согласуется с результатами расчета по уравнению состояния сплава (как и с экспериментальными данными) в рассматриваемом диапазоне давлений до 6 Мбар.

Разработанное уравнение состояния сплава ВНМ-3-2 может быть использовано при моделировании различных физических процессов при высоких плотностях энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, https://rscf.ru/project/19-19-00713/.

Использованные источники

1. Белякова М.Ю., Жерноклетов М.В., Сутулов Ю.Н., Трунин Р.Ф. Ударное сжатие металлических сплавов // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1991. – № 1. – С. 99–106.
2. Алексеев Ю.Ф., Альтшулер Л.В., Крупникова В.П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. – 1971. – № 4. – С. 152–155.

К ФОРМИРОВАНИЮ СБАЛАНСИРОВАННЫХ КВАНТОВО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ДОСТИЖЕНИЙ

Симоненко В.А.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.
v.a.simonenko@vniitf.ru

Сжато рассматривается развитие различных физических направлений, приведших к формированию квантовых представлений и первоначальных формулировок квантовой механики для описания атомных объектов. Потребность корректного описания спектра атома водорода привела к необходимости введения полуцелого спина электрона. Следующим шагом потребовался учёта релятивизма, что и было сделано Дираком.

Ключевые слова: квантовая физика, физический вакуум, электрон, позитрон, позитроний, безмассовый позитроний, квант, поляризация вакуума, нулевая температура, конденсат Ферми-Дирака, конденсат Бозе-Эйнштейна.

TO THE FORMATION OF BALANCED QUANTUM-PHYSICAL REPRESENTATIONS ON THE BASIS OF MODERN EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ACHIEVEMENTS

Simonenko V.A.
Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIITF im. academician E.I. Zababakhina, Snezhinsk, Chelyabinsk region
v.a.simonenko@vniitf.ru

The development of various physical directions that led to the formation of quantum concepts and the initial formulations of quantum mechanics for describing atomic objects is concisely considered. The need for a correct description of the spectrum of the hydrogen atom led to the need to introduce a half-integer electron spin. The next step required taking into account relativism, which was done by Dirac.

Keywords: quantum physics, physical vacuum, electron, positron, positronium, massless positronium, quantum, vacuum polarization, zero temperature, Fermi-Dirac condensate, Bose-Einstein condensate.

Сжато рассматривается развитие различных физических направлений, приведших к формированию квантовых представлений и первоначальных формулировок квантовой механики для описания атомных объектов. Потребность корректного описания спектра атома водорода привела к необходимости введения полуцелого спина электрона. Следующим шагом потребовался учёта релятивизма, что и было сделано Дираком.

Это привело к предсказанию существования античастицы электрона – позитрона. Дальнейшие работы позволили обнаружить позитрон в космических лучах. Следующим шагом было получение позитрония. Позитроний образуется в двух разновидностях, отличающихся значением спина – паро- и ортопозитроний. После аннигиляции их остаётся безмассовый объект в состоянии нулевых колебаний. Наличие таких состояний подтверждено в прямых и косвенных экспериментах. Так как при распаде позитрония на два (пара-) или три (орто) гамма-кванта они уносят только энергию и обеспечивают баланс спинов распада, то высказывается гипотеза, что безмассовый объект состоит из двух завихрённостей и обладает магнитным моментом. Поляризация этих объектов

экспериментально обеспечивает проявление электрических, и магнитных силовых линий в квазистатике, а в динамике – распространение электромагнитных волн. Постулируется, что физический вакуум наполнен такими безмассовыми объектами, которые легко поляризуются в кулоновском и магнитом поле, являясь фактически их носителем как в квазистационарных, так и волновых явлениях. Надеемся, что учёт этой составляющей физического мира открывает новые возможности для описания реальных процессов и явлений.

Изложению представленного материала способствовали три фактора: первый – две книги моего земляка и друга Л.И. Пономарёва «Под знаком кванта» [1] и монография Дж. Гринштейна и А. Зайонца «Квантовый вызов» [2], являющаяся обзором современных достижений в квантовой механике. Второй фактор – это естественное накопление новых данных, которые отсутствовали во времена формирования квантовой механики и квантовой электродинамики, анализ их позволяет осмысливать иные подходы к пониманию не только квантовых, но и классических явлений. Третий фактор обусловлен стремительным и неотвратимым движением времени, что хоронит навечно всё невысказанное, в том числе и то, что могло бы быть полезным нашей цивилизации. Надеюсь, что некоторые излагаемые здесь положения о взаимосвязи физических полей и физического вакуума окажутся полезными при дальнейшем продвижении нашей цивилизации в глубины такого таинственного и удивительного прекрасного микромира, благодаря которому мы существуем и частицами которого мы являемся.

При анализе динамики научных достижений, предшествующих периоду квантовых открытий, невольно складывается впечатление, будто интенсивное развитие различных научных областей физики, математики, химии и общего социального устройства с 17-го века специально готовило рождение новых областей науки – квантовой механики, затем – квантовой электродинамики и далее. Формировалась благоприятная научная среда, создавалась необходимая лексика, рождались новые технологии исследований, накапливались разноплановые экспериментальные данные, создавались теории – тупиковые и перспективные, формировалась область востребованности результатов квантовых теорий. На более поздних этапах оказалось, что для глубоких исследований объектов микромира понадобилось создание также мощных научных инструментов, как электронные микроскопы, мощные лазерные системы, ускорители заряженных частиц, грандиозные детекторы, мощные вычислительные комплексы для управления такими инструментами и для обработки получаемых данных.

Развитие науки, которое происходило по разным, казалось, слабо связанным направлениям, к периоду формирования квантовых представлений объединялось в единый могучий поток. Проиллюстрируем это.

1. Начнём с самого древнего научного направления – атомизма. Зарождение его в Европе относят к античным временам и связывают с именем Демокрита (примерно 460-360 до н.э.). Он опубликовал более 80 сочинений, но ни одно из них не сохранилось до нашего времени, а известны они только по цитированию. Последующим влиятельным представителем античного атомизма был Эпикур (примерно 342-271 до н.э.). Его работы были более известны потомкам, несмотря на авторитет Аристотеля, который решительно боролся с эпикуризмом, включая атомистическую составляющую этой философии. Широко известным продолжателем античного атомизма является римский поэт Лукреций Кар (примерно 99-55 до н.э.), поэма которого «О природе вещей» (около 50 г. до н.э.) сохранилась, переведена на многие языки и удивляет своей широтой и убедительностью. В пост эллинское время, в эпоху раннего и позднего средневековья в применении к явлениям природы господствовали смешанные с теологией схоластические представления, центральное место в которых занимали воззрения Аристотеля (384-322 г. до н.э.). Стали создаваться университеты в основном с теологической, экономической и медицинской направленностью, но к 16 веку в них все большее место начинают занимать научные дисциплины. Преодоление вековых теологических и схоластических наслоений было весьма

сложным, особенно в вопросе идеи геоцентризма. Наиболее яркими в этом отношении были судьбы Николая Коперника (1473-1543) и Джордано Бруно (1548-1600). Научный подход применительно к области физических представлений стал формировать Галилео Галилей (1564-1642), этому способствовало развитие различных технологических приложений физических знаний, развитие математики, создание телескопа. Постепенно круг учёных в Европе стал расширяться. Приведём лишь некоторые наиболее известные имена: Иоганн Кеплер (1571-1630), Пьер Гассенди (1592-1655, по-видимому, один из самых ярких представителей атомизма начала нового времени), Рене Декарт (1596-1650), Блез Паскаль (1623-1662), Христиан Гюйгенс (1629-1695), Исаак Ньютон (1642-1717), Эдмунд Галлей (1656-1742), Даниил Бернулли (1700-1782), Леонард Эйлер (1707-1783), Михаил Ломоносов (1711-1765), Жозеф Лагранж (1736-1813). Обратим внимание на не очень известного, но видного для своего времени инженера и ученого Руджера Иосипа Бошковича (1711-1787). В частности, им были положены начала геодезии, проведены прецизионные измерения длины меридиана, была определена форма геоида Земли. Им же была предложена оригинальная модель атома с силовым центром и различным силовым окружением, которая позже помогала Фарадею при открытии силовых линий электрических и магнитных полей.

Большое влияние на усиление позиций атомизм оказал Жозеф Луи Гей-Люссак (1778-1850). Он обнаружил, что при образовании воды тратится 200 объёмных частей водорода и 100 частей кислорода. Несколько позже он открыл закон объёмных отношений для химически взаимодействующих газов. Исследуя упругость газов в зависимости от температуры, он измерил её с высокой по тем временам точностью. Используя в качестве источника энергии открытый в 1800 г. «Вольтов столб», он открыл ряд химических элементов Na, K, B, а также расширил этот список (Cl, I, циан CNO). Далее эстафету этих открытий подхватил Амедео Авогадро (1776-1856). Научные исследования он начал с электрических явлений и работал в этой области вплоть до 1846 г., плодотворно занимался электрохимией, но наиболее яркими были его работы, посвящённые развитию молекулярных представлений. Первая их них «Очерк метода определения относительных масс элементарных молекул тел и пропорций, согласно которым они входят в соединения». Излагая основные представления молекулярной теории, Авогадро показал, что она не только не противоречит данным, полученным Гей-Люссаком, но напротив, прекрасно согласуется с ними и открывает возможность точного определения атомных масс, состава молекул и характера происходящих химических реакций. В 1814 г. Авогадро опубликовал очередной «Очерк...», в котором представил свой закон следующим образом: «…равные объемы газообразных веществ при одинаковых давлениях и температурах отвечают равному числу молекул, так что плотности различных газов представляют собою меру масс молекул соответствующих газов».

2. Параллельно шло развитие термодинамики (ТД). Казалось бы, это макроскопическое научное направление. Однако успех макроскопических теорий существенно опирается на адекватно правильное описание их свойств на микроскопическом уровне. За начало развития ТД обычно принимают работы Р. Бойля (1627-1691, *1662*) и Эд. Мариотта (1620-1684, *1676*), получивших закон поведения идеального газа при изотермических процессах. $pV = C \text{ при } T = const$. Следующим важным шагом считают работу Сади Карно (1796-1832, *1824*) – “Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу”, в которой представлена одна из формулировок второго начала ТД. Ещё один существенный шаг в понимании второго начала ТД сделал Р. Клаузиус (1822-1888). В работе «О движущей силе теплоты и о законах, которые можно отсюда получить для теории теплоты», (1850 г.) он предложил ещё одну формулировку второго начала ТД. А затем в 1865 г в работе «О различных удобных для применения формах второго начала математической теории теплоты» ввёл понятие энтропии.

В прикладном отношении в начале 1840 годов стали рассматривать вопрос, что выгоднее – электромагнитные двигатели или паровые. Так как ещё не были созданы

эффективные источники электрического тока (уголь был дешевле цинка), то первенство на время оставалось за паром. Однако такое рассмотрение способствовало углублению понимания возможности превращений одного вида энергии в другой. Накапливалась также информация о различных способах превращений разных видов энергии в работу. В частности, Ю.Р. Майер, работая судовым врачом в экспедиции 1840 г. на остров Ява, обратил внимание на светлую кровь моряков, несмотря на их тяжёлую физическую работу. В то время как в северных широтах она была темной в результате интенсивного окисления её при нагрузках. Вывод о прямом превращении теплоты в работу организмом человека он опубликовал в 1842 г. Поиск теплового эквивалента механической работы увлек Дж.П. Джоуля (1818-1888), который начал свои исследования с электродинамических экспериментов, а затем обратил внимание на эту проблему. Примерно одновременно с Майером он приходит к концепции сохранения энергии при различных превращениях. В 1841-1843 годах Джоуль проводит свою ставшую знаменитой серию экспериментов, разрешившую вопрос о механическом эквиваленте теплоты. Фактически, эти работы завершили исследования по первому началу термодинамики для простейших веществ (закону сохранения энергии).

3. Обсуждая работы 40-х годов 19 века, целесообразно отдельно остановиться на работе, выполненной в 1835 г. Майклом Фарадеем (1791-1867). В 1832 г. он первый провёл электрохимические эксперименты, ввел понятия ион, анод, катод, электролит. В упомянутой работе, используя расплав каменной соли NaCl, он установил, что при прохождении через цепь электрического заряда, равного F=96485 кулонов (в дальнейшем эта константа была названа его именем), на каждом электроде выделялось количество вещества, равное соответствующему грамм-эквиваленту. Это, с одной стороны, указывало на дискретность заряда у разных элементов, а с другой, – означало, что величину этого заряда можно получить, разделив F на количество атомов, находящихся в одном грамм-моле, которое ещё предстояло получить.

Развитие молекулярных представлений начало приносить всё новые плоды. В 1847 г. Джоуль совместно с Уильямом Томсоном (1824-1907, с 1892 г. Лорд Кельвин), также увлёкшимся идеями молекулярно-кинетической теории газов (идеальный газ – перемещение упругих шариков, а температура – мера интенсивности их движения), выполнили работу по термодинамической шкале температур и по определению абсолютного нуля температур. Основываясь на молекулярно-кинетических представлениях, И.И. Лошмидт (1821-1895) в 1865 г. оценил количество молекул в кубическом сантиметре воздуха, что явилось первой прямой оценкой числа Авогадро.

4. Развитие молекулярных представлений дало импульс новому молекулярно-кинетическому направлению исследований. Первооткрывателем стал Р. Клаузиус. Он ввёл понятия о средней длине пробега молекул, о средней скорости их движения; с единых позиций объяснил диффузию, внутреннюю вязкость и теплопроводность; помимо понятия энтропии, ввёл понятие идеального газа. Работы Клаузиуса побудили Дж.К. Максвелла (1831-1879) из более полных статистических представлений сделать оценки газовых кинетических величин. Он взял закон Гаусса в качестве базового распределения молекул по скоростям, вычислил среднюю и среднеквадратичную скорости, а затем и другие величины, уточнив некоторые коэффициенты. В этих работах (основные публикации относятся к 1860 г.) были заложены начала статистической физики. Дальнейшее развитие кинетические представления получили в работах Людвига Больцмана (1844-1906). Он расширил исследования Максвелла по статистическому описанию идеальных газов, введя учёт энергии внешнего воздействия, предложил обобщение к неравновесным системам, предложил кинетическое уравнение для описания эволюции неравновесного газа... Благодаря этим работам направления термодинамики и статистической физики вступают в фазу интенсивного развития, укрепляя свои позиции путем использования молекулярных

представлений. Ценный вклад в них внёс в Джозайя Уиллард Гиббс (1839-1903). Его шедеврами являются обоснование статистического подхода на основе закономерностей механики, углубление работ по векторному анализу, разработка теории термодинамических потенциалов, развитие теории статистических ансамблей... В целом можно признать, что итогом атомистических работ 19 века явился триумф молекулярно- кинетических представлений во всех направлениях физических и химических наук. Однако на рубеже 19-го и 20-го веков, несмотря на различные фактически необоснованные догадки, оставался неясным вопрос, что же собою представляет атом.

5. К этому же времени была накоплена богатая информация, которая указывала на то, что атом не может быть пудингом, как предложил Дж.Дж. Томсон, произвольно наполненным недавно открытыми электронами. Для понимания этого обратимся к работам, начавшимся примерно 100 лет назад. В 1802 г. Уильям Волланстон (1766-1828) обнаружил несколько тёмных линий в спектре Солнца. За ним начала восходить звезда Йозефа Фраунгофера (1787-1826). Он был одиннадцатым ребёнком в семье стекольщика, его родители рано умерли, когда ему было 11 лет. Опекун отдал его на обучение стекольному делу в Мюнхен. В 1801г. на него обрушился домом. Когда его извлекали из завалов, мимо проезжал курфюрст Баварский, которые из соболезнования дал ему денег. Йозеф потратил их на учёбу и на приобретение хороших инструментов. Он стал создавать первоклассные оптические инструменты, которые пользовались спросом, и параллельно проводил оптические измерения линий в спектре Солнца. Это дало ему возможность в 1814 г. опубликовать работу о двойном характере D-линии Солнца. К 1819 г. он уже получил данные по 574 линиям в излучении Солнца. Позже – стал профессором физики в Мюнхенском университете, открыл линии в спектре Венеры. В 1857 г. Уильям Сван (1828-1914) увидел жёлтую двойную D-линию в спектре спиртовки. А в 1859 г. эти исследования подхватили и расширили Г. Кирхгоф (1824-1887) и Р. Бунзен (1811-1899). Они заложили основы спектроскопии. Далее пришло время систематизации спектральных линий. Оно связано с именами Лаймана, Бальмера, Пашена, Ридберга, Ритца… Эти данные однозначно указывали, что атомы химических элементов характеризуются своими конкретными линейчатыми спектрами, что в свою очередь могло быть обусловлено свойствами их внутренней структуры. Но как? Оказалось, что для ответа на этот вопрос ещё нужна подсказка природы и несколько дополнительных открытий. Мы вернёмся позже к этой расширяющейся линии исследований.

6. Концепция элементарного электрического заряда, высказанная в 1835 г. М. Фарадеем, нуждалась в более полной проработке. Такая работа началась издалека. И вновь её инициировал Фарадей, предложив в 1838 г. постановку экспериментов для исследований проводимости газов («электрическое яйцо Фарадея»). Круг исследователей стал расширяться. Ю. Плюккер (1801-1868) в 1840-1850-х года усовершенствовал постановку экспериментов в трубке, создавая вакуум и применяя разные газы и давления. Его ученики пошли дальше. И. Гитторф в 1869 г. обнаружил, что наблюдаемые лучи отклоняются магнитным полем, Е. Гольдштейн в 1876 г. предложил назвать их *катодными лучами*, К. Вэрли в 1879 г. показал, что летящие частицы заряжены отрицательно. Следующий этап прогресса в исследованиях катодных лучей связан с именем У. Крукса (1832-1919). В 1878 г. он углубил вакуум в трубке. От катода отделилось тёмное пространство, и экран засветился зелёным светом (зарождение телевизора). В 1895 г. Жан Перрен окончательно доказал отрицательность заряда катодных лучей, затем убедились, что скорость летящих частиц составляет примерно 0,1 от скорости света. А в 1897 г. Дж.Дж. Томсон измерил заряд и массу этих частиц ($m = 9{,}109 \cdot 10^{-28}\,г.$). Он-то и предложил простейшую модель атома – «пудинг с встроенными в него электронами». Вопрос о размерах электрона остался открытым до сих пор.

7. Наступал рассвет новой эры. В 1895г., работая с трубкой Крукса, Вильгельм Конрад Рентген (1845-1923) открыл исходящее из трубки жесткое излучение, назвав его икс-лучами. В 1896 г., исследуя работу Рентгена, Антуан Генри Беккерель (1852-1908) хотел изучить флюоресценцию урансодержащей соли – уранилсульфата калия $K_2(UO_2)(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ – после облучая её солнечным светом. Был пасмурный день, солнца не было. Он обернул образец черной бумагой и положил её на несколько фотопластинок, но ещё до проведения облучения проявил одну из них и обнаружил почернение, подобное исследуемому образцу. После тщательных изучений других типов образцов, содержащих уран, он обнаружил, что излучение исходит из урана. Он попросил у Пьера Кюри образец радия для исследований, положил его в нагрудный карман, и обнаружил, что на груди образовалась язва. Пьер тоже повторил этот эксперимент и получил ещё более тяжёлую язву на предплечьи. Стало ясно, что имеется ещё один вид жёсткого излучения, открыватели назвали его радиоактивным. Оно быстро было признано научной общественностью, и в 1903 г. Беккерель, Пьер и Мария Кюри были удостоены Нобелевской премии. Было обнаружено, что одновременно уран испускает три вида излучения – положительно и отрицательнозаряженные частицы и нейтральное безмассовое излучение. Эрнест Резерфорд (1891-1937) предложил назвать α, β и γ -излучениями, соответственно. Вскоре было установлено, что α-частицы являются ядрами гелия, β-электронами, а γ – квантами жёсткого электромагнитного излучения. Начиналась эра работ Резерфорда и его школы... Но прервёмся на время и вернёмся к рубежу двух веков.

8. Как уже отмечалось, в 19 веке получили хорошее развитие оптические исследования. Помимо спектроскопических методов для измерений линейчатых спектров, были разработаны методы измерений потоков излучения в непрерывных частотных диапазонах. В частности, к концу 19-го века были получены и теоретически описаны данные для низких и высоких частот излучения. Попытки сшить эти данные до 1899 г. были неудачны. И лишь Максу Планку (1858 -1947) в конце 1899 году удалось предложить удачную интерполяцию, введя интерполяционную константу с размерностью действия. Занимаясь проблемой сшивки противоположных участков спектра, Планк предположил, что энергия излучается порциями $E = h\nu$. Это позволяло построить единую функцию для распределения излучения $u = u(\nu, T)$, где $h = 6{,}626075 \cdot 10^{-27}\, эрг \cdot с.$ Первым воспринял это выражение А. Эйнштейн как реальную физическую характеристику излучения, падающего на образец при исследовании фотоэффекта. Он предположил, что доля энергия фотона P при этом тратиться на вырывание электрона, а остальная часть энергии передаётся электрону в виде кинетической энергии $T = mv^2/2$, обеспечивая баланс $h\nu = P + mv^2/2$. Анализ результатов экспериментальных исследований вполне соответствовал этому предположению.

9. В результате работ Беккереля и супругов Кюри физики получили эффективные инструменты для исследований объектов атомных масштабов. Резерфорд предложил своим коллегам Гейгеру и Марсдену в 1909 году провести наблюдения прохождения α-частиц через тонкую фольгу из золота. Вначале они наблюдали наиболее вероятные отклонения пучка от направления полёта на малые углы (около 2°). А затем стали наблюдать на большие, вплоть до почти обратного отражения. Они оценили вероятность таких событий примерно1/8000. Это вызвало громадное удивление. В 1911 г. Резерфорд вывел формулу и опубликовал работу о рассеянии кулоновских частиц, получив на основе экспериментальных данных оценку для размера атомного ядра $10^{-12 \div -13}$см. На этом основании была предложена планетарная модель атома. Она сразу же вызвала серьёзные возражения. Электрон на соответствующей орбите не мог прожить дольше, чем 10^{-11}с. Вопреки этим представлениям в 1913 г. Н. Бор (1885-1962) стал продвигать эту идею, фактически постулируя существование стационарных орбит. Об этом свидетельствуют экспериментальные закономерности в оптических спектрах в виде переходов между термами, подчиняющимися

законам с целыми числами. Для водорода удалось относительно просто построить такую модель. Сложнее стало для атомов с большими атомными номерами. За построение таких моделей взялся Арнольд Зоммерфельд (1868-1961), который в дальнейшем добился определённых успехов в квантово-механических исследованиях.

10. Очень ценную идею для формирования квантовой механики предложил Луи де Бройль. С одной стороны он опирался на постулат Бора, что устойчивыми являются те орбиты атома, для которых справедливо соотношение $mvr = n\hbar$, где n – целое число. С другой, он воспользовался опубликованным в 1923 г. экспериментальным результатом Комптона о том, что достаточно жёсткие кванты при рассеянии на электронах теряют часть своей энергии, подобно частицам. Де Бройль предложил электрон представлять в виде волны. При этом, принимая по Бору $2\pi r = n\lambda$, и полагая по де Бойлю $2\pi mvr = nh$, получаем длину волны электрона (материальной частицы) $\lambda = h/mv$. В 1925 г. по приглашению Бора в Копенгаген приехал Вернер Гейзенберг (1901-1976). Здесь в результате многочисленных обсуждений он сформулировал принцип неопределённости для объектов квантовой механики. Это могло служить частичным оправданием для модели Бора. А в 1925г. Гейзенберг опубликовал свою матричную модель, опираясь на идеи Бора. В том же году, опираясь на идею де Бройля, Эрвин Шрёдингер (1887-1961) опубликовал свою квантовую модель в волновом исполнении. Он же вскоре показал эквивалентность волнового и матричного квантово-механических подходов. Оставалось только довести до алгоритмических рецептов аппарат вычислений. За эти работы с энтузиазмом взялись многие талантливые физики. С успехами этого и последовавших периодов можно познакомиться в учебниках Ландау и Лифшица [4, 5].

11. В предыдущих разделах нашего расширенного исторического экскурса, мы охватили почти все необходимые направления. Собственно, на них и ориентировались альтернативные теории Бора, Гейзенберга и Шредингера. Мы только не обсудили развитие электродинамики, которая изначально формировалась как научно обоснованная технология, а затем обрела облик полевой теории. Фактически решались практически важные задачи – создание электрогенераторов, передача электрической энергии на расстояния, распределение её по потребителям, использование электромагнитных волн (в том числе и световых) для передачи информации. Со временем было обнаружено, что электромагнитным образом на практически приемлемые расстояния могут предаваться грандиозные объёмы информации. Базис для всего этого был заложен в серии статей Фарадея «Экспериментальные исследования по электричеству», опубликованных в 1831-1835 гг. в 30 выпусках «Philosophical Transactions». Эти работы с энтузиазмом были взяты для инженерных реализаций, и стали приносить обнадёживающие результаты ещё при жизни Фарадея. С другой стороны, в 1861 г. они увлекли одного из лучших математиков 19 века Джеймса Максвелла, который последовательно облёк основополагающие экспериментальные результаты в строгое и изящное математическое убранство. В настоящее время это составляет содержание классической теории электромагнитного поля, включающей, и распространение волн электромагнитного излучения со скоростью света [6], и возможные релятивистские свойства зарядов (что стало возможным после создания А. Эйнштейном в 1905 г. специальной теории относительности). Квантовая теория для описания таких процессов была предложена в 1928 г. Полем Дираком в статье «Квантовая теория электрона» [7].

12. Фактически, создав квантовую механику, затем – квантовую электродинамику, физики получили хорошие инструменты для решения, условно назовём, «тактических задач», например, строение атомов и молекул, образование и свойства конденсированных структур, распространение слабых электромагнитных волн. Нерешёнными оставались «стратегические вопросы». Вообще, такая закономерность просматривается в различных

областях науки. В частности, классическая механика не предоставила возможностей для понимания процессов микромира и протекания процессов при релятивистских скоростях. Именно для устранения таких недостатков и развиваются новые научные направления. Квантовые научные дисциплины смогли ответить на многие вопросы микромира, неразрешённые классическими представлениями, но всплыли новые проблемные вопросы, которые оказались им не по силам. Ответы надо искать, погружаясь в новые результаты исследований, в саму природу квантовых объектов. Собственно, таков и есть путь развития науки. В частности, так создавалась квантовая электродинамика [5] предназначена для учета роли релятивистских эффектов и электромагнитных явлений в атомных масштабах. Наши знания расширяются, появляются новые вопросы, они нуждаются в новых объяснениях.

13.Но только ли в вопросах микромира остались открытие вопросы? Ответ – нет!

До сих пор мы не понимаем, что является носителем электрического и магнитного взаимодействий, что является носителем электромагнитных волн, хотя с времён Фарадея осчастливленные современники считали, что теперь всё стало ясно – таковыми являются силовые линии электрического и магнитного поля. А что же это такое – силовые линии. Для ответа на эти вопросы вновь обратимся к статье Дирака, опубликованной в 1928 г. В которой было представлено инвариантное уравнение движения для биспинорного классического поля электрона [7]. Важным выводом этой теории является указание на то, что имеется физический вакуум. Будем считать, что он заполнен безмассовыми объектами, которые, по-видимому, образовались при аннигиляции частиц и античастиц с полуцелым спином.

14. Естественно считать, что верхний уровень такого вакуума заполнен безмассовыми позитрониями (БМП), на более глубоких уровнях находится, например, безмассовый остатки более тяжёлых частиц (например, кварков). На реальность существования БМП указывает рождение пары $e^{-}e^{+}$ при пролёте γ – кванта с достаточно большой энергией (около 3 МэВ) вблизи атомного ядра. Основываясь на таких предположениях будем считать, что заряды окружены полем поляризованных БМП, плотность которого убывает по мере удаления от заряда. Эта среда и является носителем кулоновского поля. Ясно, что для заряда противоположного знака поляризация БМП-«шубы» имеет противоположное направление. При столкновении зарядов противоположных знаков, по мере их сближения происходит, ликвидация части поляризованных облаков обеих зарядов путем их взаимной нейтрализации.

15. Рассмотрим для примера сближение протона и электрона. В силу большой массы протона и малого его размера он сам фактически будет покоиться, а электрон будет, ускоряясь, к нему приближаться. При этом в перекрывающихся частях кулоновских облаков (поляризационных «шуб») в соответствии с векторным сложением направлений и амплитуд в конкретных точках будет происходить частичная нейтрализация. Так как заряд в коренном теле электрона не изменяется, то это может привести к перетеканию заряда (по-видимому, вместе с веществом) в области, менее затронутые или ещё не затронутые влиянием нейтрализации. Можно предположить, что такой механизм будет в меньшей мере влиять на вещество протона. По мере ускорения электрона, согласно Де Бройлю, начинает усиливаться его корпускулярность, то есть происходит уменьшение его волнового масштаба. В рассматриваемом случае это выразится в деформации собственного материального тела электрона. Для простоты будем считать это вещество несжимаемым. Тогда материальная часть электрона будет деформироваться, подстраиваясь под искажения его собственного «кулоновского» поля. Так как заключительные процессы происходят в области наиболее высоких напряжений, можно ожидать, что они будут протекать с максимальной скоростью. Массивная часть электрона начинает, растягиваясь, оборачиваться по равно напряженной поверхности вокруг центра масс (в нашем случае ядра атома) и образует замкнутую поверхность. В условиях неоднородного поля заряда такое «развёртывание» материальной части электрона на s-оболочке означает бесконечное увеличение его размера, в соответствии

со значением фактической температуры внутри атома T=0. Внутренняя часть этой поляризационной «шубы» ядра и электрона остаётся для взаимной компенсации зарядов ядра и электрона. А из наружных частей образуются два фотона разных энергий.

16. Образование позитрония происходит аналогично образованию атома водорода, только частицы сближаются к центру масс, и обе оказываются на S оболочке, которая в этом случае становится вырожденной. Такая система заведомо неустойчива. Поскольку приведенная масса позитрония почти вдвое меньше приведённой массы электрона, радиус атома позитрония в основном состоянии 0,106 нм (вдвое больше атома водорода), а его потенциал ионизации из основного состояния равен 6,77 эВ (вдвое меньше потенциала ионизации водорода). Позитроний быстро аннигилирует, его время жизни зависит от ориентации спинов частиц: покоящийся парапозитроний (с противоположно направленными спинами) в вакууме аннигилирует в среднем за 0,1244 нс. Он аннигилирует на два гамма-кванта с энергией по 511 кэВ и с противоположно направленными импульсами. Ортопозитроний живёт на три порядка дольше 138,6 нс и аннигилирует на три гамма кванта.

17. Аналогично водороду формируется электронная система многозарядного ядра. Отличие состоит в том, что электроны занимают новые неповторяющиеся состояния в структуре иона и далее атома. Такой уединённый атом также представляет собою Ферми-Дираковский конденсат в неоднородном кулоновском поле с температурой, равной нулю. Таким образом, мы живем в мире, заполненном несчётным множеством атомов – частичек конденсата Ферми-Дирака – и сами из них состоим. Искусственно в современных экспериментах получают также и объекты Бозе-Эйнштейновского конденсата. Одним из распространённых примеров является лазерное излучение. Другим, – искусственно получаемые системы атомов с целым спином, замедленных до низких температур [2].

18. Что же собою представляет физический вакуум. Это не диссипативная среда, состоящая из безмассовых объектов, оставшихся после аннигиляции позитрониев, и других пар более массивных частиц и античастиц. Они являются носителями нулевых колебаний прародительских объектов. Они состоят из двух прототипов с разных завихрённостей и соответствуют спинам, оставшимися от первичных материальных частиц. Можно предположить, что именно с этими завихрённостями связан магнитный момент, причём величина его зависит от взаимной направленности вихрей. В силу бездиссипативности среды завихрённости не затухают, а при образовании новой пары они переходят к реальным объектам. БМП и другие аналогичные объекты легко поляризуются и служат проводниками линий электрической напряжённости в случае кулоновского потенциала или магнитной напряжённости при магнитной индукции. В случае распространения электромагнитной волны они выполняют аналогичные функции для электрической и магнитной составляющей кванта.

19. Укажем ещё один класс явлений, которые, по нашему мнению, также свидетельствуют о наличии достаточно однородного фона по плотности объектов физического вакуума и спектру частот, которые представлены в нём. Этим классом являются времена распада возбуждённых состояний атомных и ядерных систем. Представляется, что систематизация такой информации позволит получить количественные оценки для спектров, типов и концентрации безмассовых объектов физического вакуума.

В заключение хочу выразить надежду, что приведенные соображения будут достаточными для внимательного читателя, чтобы начать более глубоко разбираться в спектре возникающих вопросов.

Использованные источники:

1. Л.И. Пономарёв, «Под знаком кванта», Москва, Физматлит, 2007 г.
2. Дж. Гринштейн, А. Зайонц, «Квантовый вызов», Издательский Дом, Интеллект, 2012г.
3. E.Ratherford, The Scatering α and β Particals by Matter and Structure of the Atoms. Philosophical Magazine, LXXIX, 6, (1911), 21.
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Квантомая механика. Нерелятивистская теория, Москва, Наука, 1989 г.
5. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, Квантовая электродинамика, Москва, Наука, 1989г.
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теория поля, Москва, Наука, 1988 г.
7. П. А. М. Дирак. Квантовая теория электрона // СНТ. — Т. 2. — С. 327—351.

УРОВНИ ЭНЕРГИИ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ГЕЛИКОИДАЛЬНО СКРУЧЕННОЙ НАНОЛЕНТЕ ДЛЯ ДИРАКОВСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Скрябин С.Н., Петрова Ю.А., Садыков Н.Р.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
stepan.skryabin.04@mail.ru

Для удлиненных плоских или геликоидально скрученных нанолент с крессельными краями исследовано влияние поверхностного потенциала на параметры стационарных состояний электронов вблизи точек Дирака. Для этого реализованы алгоритмы поиска собственных значений энергии и собственных функций стационарных состояний в поперечном и продольном направлениях. Из результатов расчетов следует, что возможна в зависимости от параметров наноленты ситуация, когда ее упругие свойства исчезают. расчеты.

Ключевые слова: четырехточечная элементарная ячейка, поверхностный потенциал, наноленты крессельного типа, поверхностная энергия, метод обратных итераций, уравнение гипергеометрического типа, уровни энергии стационарных состояний.

ENERGY LEVELS OF STATIONARY STATES OF ELECTRONS WITH SURFACE POTENTIAL IN A HELICOIDALLY TWISTED NANOLIBLE FOR DIRAKO MATERIALS

Skryabin S.N., Petrova Yu.A., Sadykov N.R.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region
stepan.skryabin.04@mail.ru

For elongated flat or helicoidally twisted nanoribbons with armchair edges, the influence of the surface potential on the parameters of stationary states of electrons near the Dirac points is studied. For this, algorithms for searching for energy eigenvalues and eigenfunctions of stationary states in the transverse and longitudinal directions are implemented. It follows from the calculation results that, depending on the parameters of the nanoribbon, a situation is possible when its elastic properties disappear. calculations.

Key words: four-point unit cell, surface potential, armchair-type nanoribbons, surface energy, back iteration method, hypergeometric type equation, energy levels of stationary states.

1. Квантовые состояния для свободных электронов в узких графеновых нанолентах с учетом поверхностного потенциала.

Из четырехточечной элементарной ячейки, используя метод разделения переменных, реализуется уравнения для волновой функций

$$\tilde{\phi}^{\mathcal{S}}_{\sigma,\rho}(q^1,q^2)=\tilde{\phi}_{\mathrm{a}}(q^1)\tilde{\phi}^{\mathcal{S}}_{\mathrm{b},\sigma,\rho}(q^2),\qquad \left[\frac{\partial^2}{\partial(q^1)^2}+\frac{\kappa^2 q^1}{1+(\kappa q^1)^2}\frac{\partial}{\partial q^1}+\frac{\kappa^2}{\left[1+(\kappa q^1)^2\right]^2}\right]\tilde{\phi}_{\mathrm{a}}(q^1)=$$

$$-\frac{2m_e\left(\tilde{\mathcal{E}}_1-\mathcal{E}_{\mathrm{F}}\right)}{\hbar^2}\tilde{\phi}_{\mathrm{a}},\quad \frac{\partial^2}{\partial(q^2)^2}\tilde{\phi}^{\mathcal{S}}_{\mathrm{b},\sigma,\rho}(q^2)+\left[\left(\frac{\tilde{\mathcal{E}}-\tilde{\mathcal{E}}_1+|e|Wq^2}{\hbar v_F}\right)^2-\frac{2m_e\left(\tilde{\mathcal{E}}_1-\mathcal{E}_{\mathrm{F}}\right)}{\hbar^2}-i\sigma\frac{|e|W}{\hbar v_F}\right]\tilde{\phi}^{\mathcal{S}}_{\mathrm{b},\sigma,\rho}=0,\quad (1)$$

где $\kappa-$ кручение наноленты, при $\kappa=0$ реализуется плоская нанолента. Для поперечных функций состояний $\tilde{\phi}_{\mathrm{a}}(q^1)$ был реализован метод обратных итераций (или модифицированный метод Виландта) [1]. Для продольных функций состояний $\tilde{\phi}^{\mathcal{S}}_{\mathrm{b},\sigma,\rho}$

последнее уравнение (1), которое является обобщенным уравнением гипергеометрического типа, сводилась к уравнению гипергеометрическому типу. Два независимых решения гипергеометрического уравнения получены с помощью гипергеометрических рядов [2].

2. Результаты расчетов.

Таблица 1. Расчет уровней энергии стационарных состояний в поперечном направлении $\mathcal{E}_1, \tilde{\mathcal{E}}_1$ для потенциальной ямы с прямоугольным профилем и энергии $(\mathcal{E} - \mathcal{E}_1)$ и $(\tilde{\mathcal{E}} - \tilde{\mathcal{E}}_1)$ в продольном направлении наноленты. В колонке 3 приведены уровни энергии для плоской наноленты.

Номер состояния	Полная энергия основного состояния нанолент, eV		Аналитические уровни энергии (рис 1a), eV	Расчетные уровни энергии (рис 1b), eV	
k	Плоская нанолента, $(\mathcal{E} - \mathcal{E}_1)$	Геликоидальная нанолента, $(\tilde{\mathcal{E}} - \tilde{\mathcal{E}}_1)$	Плоская нанолента, $\mathcal{E}_1$	Плоская нанолента, $\mathcal{E}_1$	Геликоидальная нанолента, $\tilde{\mathcal{E}}_1$
1	0.04856	0.04839	-6.151051991	-6.203933298523	-6.2182
2	0.05159	0.05154	-5.404208580	-5.618614780547	-5.6418
3	0.05311	0.05310	-4.159471612	-4.653893393031	-4.6671
4	0.05408	0.05407	-2.416844161	-3.331784493445	-3.3545
5	0.05477	0.05477	-0.1763305304	-1.706230744514	-1.7183
6			–	-0.047968551637	-0.0645

На рис. 1 приведена зависимость нормированных функций состояний в поперечном направлении наноленты с крессельными краями.

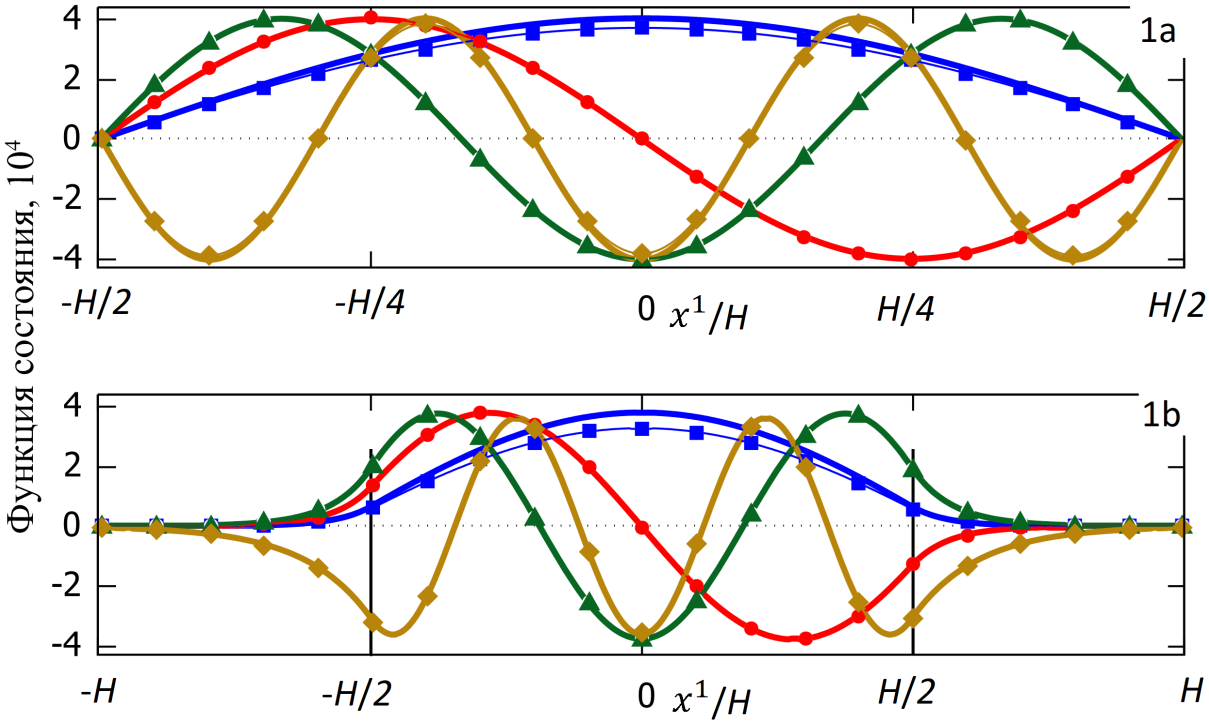


Рис. 1. Функции состояний в поперечном направлении от x^1/H ($H = 1.23$ nm) с крессельными краями: рис. 1a соответствует случаю бесконечно глубокой ямы (71) ($|x^1| \leq H/2$ или $|q^1| \leq H/2$); рис. 1b – неглубокой потенциальной ямы (71) ($|x^1| \leq 5H$ или $|q^1| \leq 5H$).

На рис. 1 сплошные линии соответствуют случаю плоской наноленты; а маркеры «квадрат», «круг», «треугольник», «ромб» соответствуют геликоидальной наноленте (соответственно – первый, второй, третий и пятый уровни энергии). Также вычислены уровни энергии и волновые функции состояний в продольном направлении [3].

В таблице 2 приведена зависимость упругой свободной энергии упругой деформации $\mathcal{F}$, скоростей υ, υ_{sp} и частот ω, ω_{sp} крутильных колебаний наноленты от a/b, где скорость и частота крутильных колебаний наноленты вычислялись по формулам [4]

$$\upsilon_{\text{sp}} = \sqrt{(C + C_{sp})/(\rho I)}, \qquad \omega_{\text{sp}} = \pi \upsilon_{\text{sp}}/L,$$

$$C_{\text{sp}} = -\left[\frac{8H}{(3\sqrt{3}b^2\kappa^2)}\right]\Delta\mathcal{E}, \qquad C = \frac{EHa^3}{6(1+\sigma)},$$

где $E = 1.05{\sim}1.029 \times 10^{12}$Па – модуль Юнга, $\sigma = 0.139$ – коэффициент Пуассона, $L = 10H$ – длина наноленты, a – толщина наноленты, $b = 1.42$nm – расстояние между атомами углерода.

Таблица 2.

a/b	1.153	1.155	1.16	1.2	1.5	2
$\mathcal{F}$, eV	8.32	8.36	8.47	9.38	18.32	43.42
$\upsilon, m/s$	2653	2660.2	2677.5	2817.2	3937.2	6061.7
$\omega, s^{-1} \times 10^{11}$	6.78	6.79	6.84	7.2	10	15.5

$v_{\mathrm{sp}}, m/s$	4.4	195.9	361.5	947.7	2909.1	5450.3
$\omega_{\mathrm{sp}}, s^{-1} \times 10^{11}$	0.011	0.5	0.92	2.42	7.43	13.92

Заключение

Из уравнений (1) следует, что наличие поверхностного потенциала приводит к изменению уровня энергии основного состояния плоской и геликоидальной нанолент $\mathcal{E}$, $\tilde{\mathcal{E}}$ за счет изменения уровней энергии $\mathcal{E}_1, \tilde{\mathcal{E}}_1$ в поперечном направлении относительно уровня Ферми $\mathcal{E}_{\mathrm{F}}$ для потенциальной ямы с прямоугольным профилем (см. таблицу 1), а также изменения на незначительную величину уровней энергии $(\mathcal{E} - \mathcal{E}_1)$ и $(\tilde{\mathcal{E}} - \tilde{\mathcal{E}}_1)$ в продольном направлении наноленты.

В случае материалов Шредингеров результаты опубликованы в [5].

Использованные источники:

1. Wielandt H. Das Iterations verfahren bei nicht selbstadjungierenten linearen Eigenwertaufgaben // Math. Z. - 1944. Vol. 60. P. 93–143.
2. А. Ф. Никифоров, В. Б. Уваров, Специальные функции математической физики, Физматлит, М., 1978.
3. Sadykov, N. R., Muratov, E.T., Pilipenko, I.A., Aporoski, A.V.: Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, V. 120, 114071 (1–11) (2020). https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114071
4. Петрова Ю. А., Скрябин С. Н., Садыков, ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ЧАСТОТУ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ НАНОЛЕНТ. Тезисы доклада на Заседания Тематических секций Научной сессии НИЯУ МИФИ – 2023 по направлению «Инновационные ядерные технологии» февраль 2023 (принято в печать).
5. Садыков Н.Р., Петрова Ю.А., Храбров Р. С., Скрябин С. Н., Журнал физической химии, принята в печать, 2023, февраль.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Стаханов В.В.[1,2], Яковлев С.А.[1], Безгодов Е.В.[1,2], Попов И.А.[1], Пасюков С.Д.[1], Тараканов А.А.[1]
[1]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.,
[2]ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
stakhanovvv@vniitf.ru

В данной работе была проведена верификация расчетной методики распространения и диффузии водорода при истечении в замкнутом объеме. Для верификации были использованы данные при проведении экспериментов по заполнению и выдержке водорода в квадратной трубе. Данные по распределению объемной доли водорода по высоте установки в расчете находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. При заполнении в начальный момент наблюдается стратификация водорода, однако вследствие диффузии, содержание водорода в смеси постепенно выравнивается по всему объему установки.

Ключевые слова: диффузия, водород, CFD-моделирование, экспериментальное исследование, водородная энергетика.

VERIFICATION OF THE CALCULATION METHOD OF HYDROGEN DIFFUSION IN CONFINED SPACE

Stakhanov V.V.[1,2], Yakovlev S.A.[1], Bezgodov E.V.[1,2], Popov I.A.[1], Pasyukov S.D.[1], Tarakanov A.A.[1]
[1] FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia
[2]FSAEE HE «Snezhinsk physicotechnical institute of National research nuclear university MEPhI», Snezhinsk, Russia
stakhanovvv@vniitf.ru

In this paper the verification of the calculation method of hydrogen diffusion in confined space was performed. Experimental data of hydrogen filling and diffusion iiin square tube was used for verification. Numerical data of distribution of hydrogen volume fraction are in a good agreement with experimental data. At initial time, the hydrogen stratification was observed, but hydrogen concentration gradually became uniform due to diffusion.

Key words: diffusion, hydrogen, CFD-modelling, experimental investigation, hydrogen energy.

В настоящее время происходит активное развитие водородной энергетики. Одним из возможных аварийных сценариев на объекте водородной энергетики может являться утечка водорода в закрытом помещении с образованием воспламеняемой водородно-воздушной смеси. Для оценки последствий при развитии такого аварийного сценария, требуются расчетные методики, способные прогнозировать изменение состава смеси в объеме помещения.

Описание используемой в данной работе расчетной методики представлено в работе [1]. Для верификации были использованы экспериментальные данные по заполнению и диффузии водорода в замкнутом объеме. Эксперименты проводились на трубе квадратного сечения 0,6 × 0,6 м и длиной 12 м. На верхней грани трубы располагаются 20 пар отверстий, диаметром 17 мм, равномерно распределенных по поверхности. Через отверстия подается

водород с заданным массовым расходом в течение некоторого времени, после чего, происходит процесс перемешивания водорода и воздуха за счет диффузии по всему объему установки.

Для численного моделирования была использована расчетная область размером $0{,}6 \times 0{,}6 \times 0{,}6$ м^3, представленная на рисунке 1. Указанная область соответствует части установки, содержащей пару отверстий для заполнения, поскольку заполнение установки происходит равномерно по всей длине. Грани A-B-B1-A1 и D-C-C1-D1 являются периодическими границами, т. е. поток вещества на одной грани переносится на другую грань, т. о., моделируется приток и отток водорода в расчетную область из соседних отверстий.

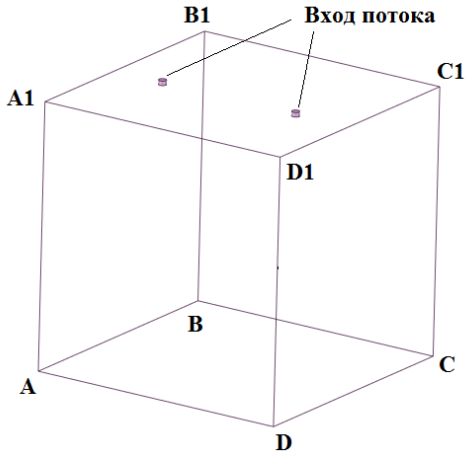


Рисунок 1 - Схема расчетной области
D-C-C1-D1, A-B-B1-A1, A-B-C-D, A1-B1-C1-D1 – непроницаемые стенки, A-D-D1-A1 и B-C-C1-B1 – периодические границы, «Вход потока» – граница входного потока водорода.

В таблице 1 представлены начальные и граничные условия расчетов, соответствующие условиям проведения экспериментов. Массовый расход водорода на области входа потока, заменялся условием непроницаемой стенки по истечению указанного в таблице 1 времени подачи. На непроницаемых стенках скорость потока задается равной нулю. В начальный момент расчетная область заполнена воздухом, составом 79 об. % N_2 и 21 об. % O_2.

Таблица 1 – Постановка расчетов

№	P_0, кПа	T_0, К	Массовый расход H_2, кг/с	Время подачи, с
1	85	293	$4{,}2 \cdot 10^{-5}$	65
2	80	293	$4{,}2 \cdot 10^{-5}$	86

На рисунке 2 представлены распределения объемной доли водорода по высоте в расчете и эксперименте на выделенные моменты времени. Наблюдается хорошее согласие результатов численного моделирования и эксперимента. За счет протекания диффузии, градиент объемной доли водорода вдоль высоты уменьшается со временем.

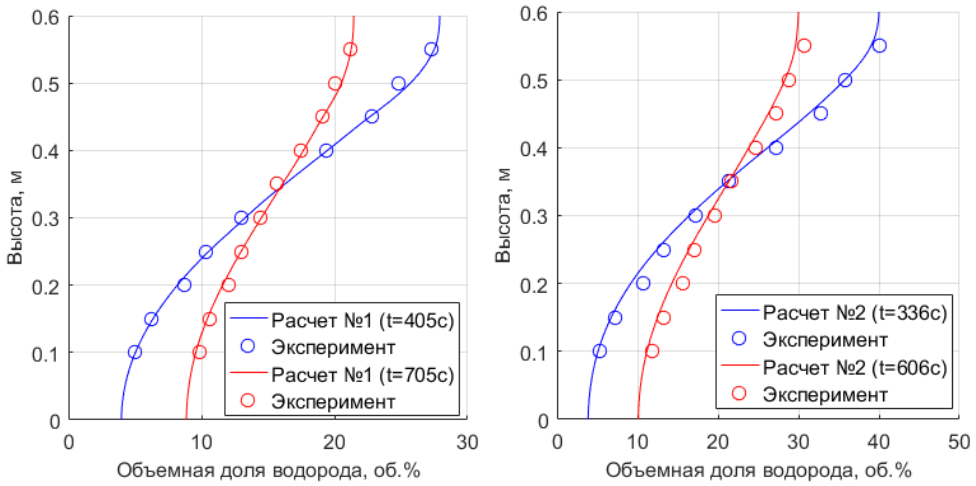
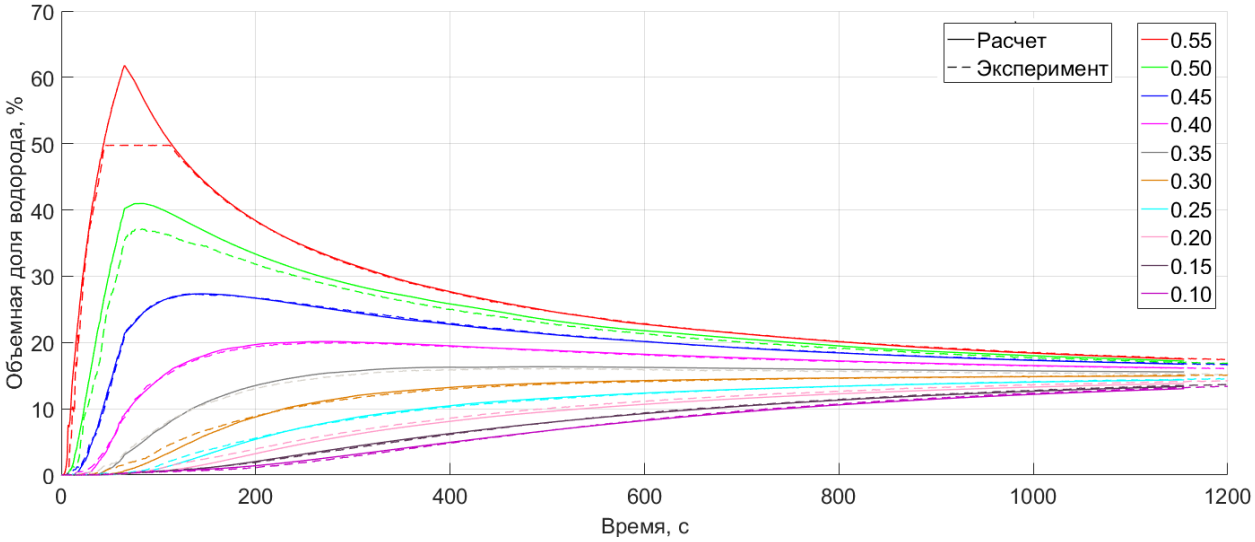


Рисунок 2 – Профиль объемной доли водорода вдоль высоты установки в расчете и эксперименте.

На рисунке 3 представлены зависимости объемной доли водорода от времени в расчете №1 и соответствующем эксперименте.



* верхний предел регистрации датчиком концентрации водорода в эксперименте составляет 50 об. %

Рисунок 3 – Зависимость объемной доли водорода от времени на различных высотах установки в расчете №1 и эксперименте.

Как видно из рисунка 3, хорошее согласие расчета и эксперимента в различных точках по высоте установки наблюдается во всем временном промежутке, что говорит о том, что данная расчетная методика может быть использована для прогнозирования изменения состава водородно-воздушной смеси в случае аварийного истечения водорода, а также для создания градиента объемной доли водорода, необходимого для проведения экспериментов по горению неоднородно распределенной по пространству водородно-воздушной смеси.

Использованные источники:

1. В. В. Стаханов, Е. В. Безгодов. Численное моделирование распространения и диффузии водорода в ограниченном пространстве. – В сб.: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2020 по направлению «Инновационные ядерные технологии». 22-23 декабря, г. Снежинск, СФТИ НИЯУ МИФИ, 2020, с. 166-168.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УСТАНОВКИ В ОБЛАСТЯХ КОНЦЕНТРАТОРОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Степанов И.Ю[1,2]., Коробейников К.А[1]., Никульшин М.В[2]., Минаев И.В[2]
[1]*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*
[2]*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.*
konstkor62.1962@mail.ru

В работе численным методом конечных элементов определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) корпуса установки в областях концентраторов напряжений в различном исполнении корпусов люков (иллюминаторов).

Ключевые слова: *численные методы, напряженно-деформированное состояние, концентраторы напряжений.*

THE STRESS-STRAIN STATE OF THE INSTALLATION IN THE AREAS OF CONCENTRATORS UNDER THE ACTION OF INTERNAL PRESSURE

Stepanov I.Y[1,2]., Korobeynikov K.A[1].,Nikulshin M.V[2].,Minaev I.V[2].
[1]*Snezhinsk Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region.*
[2]*FSUE RFNC-VNIITF named after Acad. E.I. Zababakhinf, Snezhinsk, Chelyabinsk region.*
konstkor62.1962@mail.ru

In this paper, the numerical finite element method determines the stress-strain state (VAT) of the installation housing in the areas of concentrators in various versions of hatch housings (portholes).

Key words: numerical methods, stress-strain state, stress concentrators.

Как показали результаты предыдущих расчетов, максимальные напряжения достигаются в областях концентраторов: в зонах стыковки люков, иллюминаторов с корпусом.

Для снижения уровня напряжений предлагается рассмотреть использование корпусов люков (иллюминаторов) с усилением.

Так как корпус установки представляет собой цилиндрическую оболочку, то влияние усиления корпусов люков рассмотрено для упрощенных моделей корпуса камеры (рисунок 1).

Заданные граничные условия соответствуют ограничению перемещений узлов перпендикулярно плоскости симметрии, так же ограничено перемещение узлов вдоль оси Y. Нагружение моделей осуществлялось заданием равномерного внутреннего давления величиной 1 МПа.

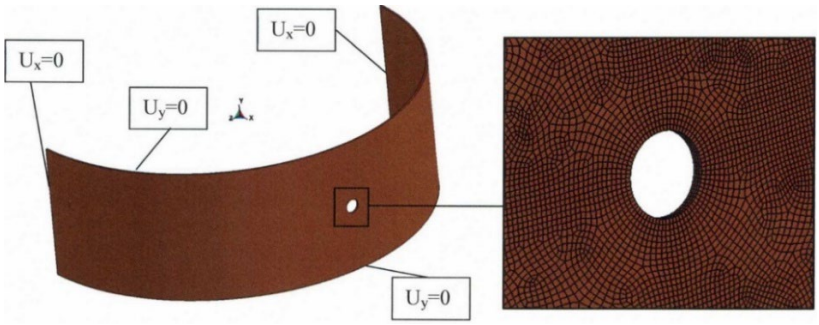
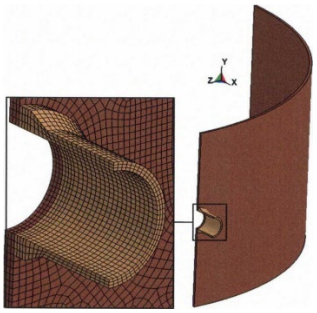


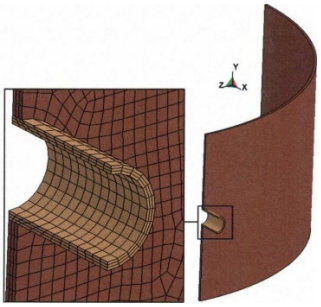
Рисунок 1 – Геометрическая модель оболочки с отверстием диаметра 150 мм

Для анализа напряженно-деформированного состояния геометрической модели рассматриваются следующие расчетные случаи:

1) оболочка с отверстием диаметра 150 мм (с усилением, без усиления);
2) оболочка с отверстием диаметра 300 мм (с усилением, без усиления);
3) оболочка с отверстием диаметра 600 мм (с усилением, без усиления).



С усилением



Без усиления

Рисунок 2 – Конечно-элементная модель

При построении конечно-элементных моделей использовались твердотельные элементы. Материал – сталь 12Х18Н10Т.

Аналитический расчет геометрической модели оболочки без отверстия по формуле представленной ниже показал, что σ = 104 МПа.

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{h},$$

где p = 1 МПа – действующее давление;

r = 2080 мм – радиус оболочки;

h = 20 мм – толщина оболочки.

При численном расчете максимальные напряжения которые приходятся на внутреннюю поверхность геометрической модели составили 103,6 МПа что подтверждает хорошую сходимость результатов аналитического и численного расчетов.

Материал корпуса камеры без отверстия при действии внутреннего давления 1 МПа работает упруго. Коэффициент запаса по пределу текучести составляет К = 2,2.

Численные расчеты геометрической модели оболочки с отверстием для девяти вариантов позволили оценить влияние диаметра отверстия и усиления люков на величину напряжений и пластических деформаций.

Максимальные значения эквивалентного по Мизесу напряжения и пластической деформации для трех расчетных случаев приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов при действии внутреннего давления 1 МПа

Расчетный случай, №	**Без отверстия**	**С отверстием**		**С усилением**		**Без усиления**	
	Напряжения, МПа	Напряжения, МПа	Пластическая деформация, %	Напряжения, МПа	Пластическая деформация, %	Напряжения, МПа	Пластическая деформация, %
1	103,6	235,3	0,05	235,3	0,05	235,1	0,012
2		236,2	0,21	235,3	0,05	235,4	0,075
3		236,9	0,34	235,6	0,11	236,1	0,19

Как видно из таблицы максимальные значения напряжений в геометрической модели без отверстия составляют 103,6 МПа, с отверстием – 235,3 МПа, 236,2 МПа и 236,9 МПа для

первого, второго и третьего расчетного случая соответственно и незначительно превышают условный предел текучести материала ($\sigma_{0,2}$ = 235 МПа).

Отверстие увеличивает напряженное состояние модели в 2,2 раза. Для первого расчетного случая влияния усиления на уровень пластический деформаций нет. Во втором расчетном случае пластическая деформация в модели с усилением снижается на 0,16 %, без усиления на 0,135 %. В третьем расчетном случае пластическая деформация в модели с усилением снижается на 0,23 %, без усиления на 0,15 %.

Выводы:

1. Сопоставление результатов конечно-элементных расчетов с результатами, полученными с использованием аналитической зависимости показали их высокую сходимость.
2. Корпус камеры при действии внутреннего давления 1 МПа работает упруго. Коэффициент запаса по пределу текучести составляет К=2,2. В зонах стыковки люков, иллюминаторов с корпусом камеры напряжения достигают предела текучести материала. Максимальный уровень пластической деформации не превышает 0,19 %.
3. Усиления корпусов люков, иллюминаторов в зонах стыковки с корпусом камеры позволяют снизить уровень пластических деформаций незначительно до 0,11 %.
4. В дальнейшем необходимо оценить влияние кратковременных скачков давления (вариант динамической нагрузки) на величину напряжений и деформаций в зоне концентраторов напряжений.

Использованные источники:

1. Марочник сталей и сплавов. 5-е изд., стереотипное. / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский и др. Под общей ред. Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 1216 с.
2. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики, А. О. Шимановский, А. В. Путято. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 61 с.

РАСЧЕТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА В ИНТЕРЕСАХ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Томилов Ю.А. [1,2], Щенникова Е.М. [1,2]
[1]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.,
[2] ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
tomilovyua@vniitf.ru

В данной статье описывается процесс создания и верификации расчетной модели экспериментальной установки. Она предназначена для верификации модели работы пассивного каталитического рекомбинатора водорода (ПКРВ), а также для обоснования методик испытания ПКРВ.

Ключевые слова: расчетная модель, ПКРВ, CFD-моделирование, водород, водородная безопасность, экспериментальная установка.

CALCULATED PROVIDING OF PASSIVE AUTOCATALYTIC RECOMBINER TESTING FOR THE CONVENIENCE OF HYDROGEN SAFETY

Y. A. Tomilov[1,2], E.M. Shchennikova [1,2]
[1] FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia
[2]FSAEE HE «Snezhinsk physicotechnical institute of National research nuclear university MEPhI», Snezhinsk, Russia
tomilovyua@vniitf.ru

In this article creation and verification procedure of test facility simulation model is described. It is designed for verification of passive autocatalytic recombiner (PAR) operation model, as well as for validation of techniques for PAR testing.

Key words: simulation model, PAR, CFD-simulation, hydrogen, hydrogen safety, test facility.

В рамках исследований РФЯЦ-ВНИИТФ по теме водородной взрывобезопасности и управлению тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР проводились экспериментальные исследования ПКРВ на установке БМ-П [1]. Для верификации модели работы ПКРВ потребовалась разработка численной модели экспериментальной установки. В свою очередь, проводилась верификация самой модели установки с помощью данных, полученных в пилотных экспериментах, направленных на проверку работоспособности установки и ее систем. Для этого была создана расчетная модель установки, проведены предтестовые расчеты экспериментов и сопоставление их результатов с результатами экспериментов, последующая доработка расчетной модели экспериментальной установки в целях улучшения сходимости результатов [2]. В итоге были получены следующие результаты:

– в расчете с остыванием установки после нагрева было установлено хорошее соответствие с результатами эксперимента, что показало, что геометрия установки, теплофизические свойства материалов и теплоотдача в окружающую среду моделируется корректно;

– результаты расчетов по нагреву установки от системы электронагрева показали завышение значений относительно экспериментальных. Ввиду сложности учета особенностей работы системы электронагрева и неидеальности прилегания ее элементов к

корпусу установки в качестве доработки модели введен коэффициент эффективности (k=0,76) системы электронагрева, что позволило в нескольких расчетах (с вынужденной конвекцией внутри установки и без нее) получить хорошее совпадение с результатами экспериментов;

– в расчете с нагревом установки от имитатора ПКРВ значения температуры в контрольных точках внутри короба имитатора оказались ниже, чем в эксперименте, что позволило сделать вывод о необходимости учета сеток на входном и выходных окнах рекомбинатора;

– результаты расчетов с заполнением установки водородом также показали хорошее соответствие с результатами эксперимента, что говорит о том, что в модели установки достоверно моделируется подача газов, в том числе при наличии устройства распределения потока (УРП),

– расчетная модель установки позволила определить требуемую конфигурацию УРП для ее изготовления «в металле», при этом работа устройства в расчетной модели установки задается упрощенно;

– в отдельном расчете получена рабочая характеристика вентилятора для его упрощенного моделирования в установке;

– добавлена модель теплообменного аппарата в установке.

Таким образом, работа всех основных систем установки была воспроизведена в модели, а хорошее совпадение с данными экспериментов показали достоверность такого моделирования и применимость модели установки для моделирования испытаний ПКРВ и верификации модели работы рекомбинатора (верификация модели установки позволила снизить ее вклад в общее отклонение расчетов от данных, полученных в испытаниях ПКРВ).

Отдельно стоит отметить, что расчетная модель установки также использовалась для обоснования постановок экспериментов, в частности, для определения условий в установке при испытаниях с внешними скоростными потоками, а также для обоснования расположения средств измерений.

Для определения условий в установке при испытаниях ПКРВ и апробации моделирования работы рекомбинатора были проведены расчеты испытания рекомбинатора в установке при нормальных условиях [3]. В расчетной модели установки каталитический блок ПКРВ моделировался как пористое тело. Производительность рекомбинатора, то есть скорость поглощения водорода в каталитическом блоке, вычислялась по эмпирической зависимости из статьи [4]. Энерговыделение в катализаторе вычислялось как произведение производительности ПКРВ и энергии, выделяющейся при окислении водорода. Скорость поглощения кислорода и генерации пара определялась в соответствии со стехиометрическим соотношением реагентов и продуктов в реакции окисления водорода. Потери давления на каталитическом блоке определялись из зависимости, приведенной в [5]. Короб ПКРВ задавался как теплопроводные стенки, сетки на окнах рекомбинатора – как проницаемые границы с соответствующим стоком импульса. Потери давления на сетках окон определялись в отдельном расчете с подробной геометрией для упрощенного моделирования в расчетной модели установки. На стадии предварительных расчетов была отмечена необходимость доработки модели в части моделирования процесса конденсации водяного пара на внутренней поверхности установки, а также необходимость уточнения теплофизических свойств катализатора. Уточнение теплофизических свойств потребовало проведение дополнительного расчета рекомбинации водорода на каталитических стержнях в испытательной камере с использованием детального кинетического механизма [6]. Модель конденсации на поверхности также была добавлена в расчетную модель установки.

Последующее сравнение результатов расчета испытаний рекомбинатора в нормальных условиях показало хорошее соответствие результатов расчета с данными эксперимента, в частности по производительности ПКРВ, за исключением моделирования старта рекомбинатора, что определяется моделью работы рекомбинатора. Отклонение расчетных зависимостей температур внутри короба рекомбинатора и на выходе из него

предположительно связано с изменением гидродинамического сопротивления на сетках окон рекомбинатора. Таким образом, требуется уточнение зависимости коэффициентов сопротивления от условий среды.

Созданная расчетная модель экспериментальной установки применима для дальнейшей верификации моделей испытываемых рекомбинаторов, так как ее вклад в общее отклонение результатов расчетов от данных, полученных в испытаниях ПКРВ, незначителен. Также расчетная модель установки может быть использована для обоснования постановок различных экспериментов в ней.

Использованные источники:

1. Безгодов Е.В., Крюков В.М., Пасюков С.Д. и др. Разработка методик испытаний по определению характеристик пассивных каталитических рекомбинаторов водорода // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XV Международной конференции 27 сентября – 1 октября 2021. – Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2021. – 302 с. ил.
2. Щенникова Е.М., Томилов Ю.А. Разработка модели установки БМ-П для испытания пассивных каталитических рекомбинаторов водорода // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XV Международной конференции 27 сентября – 1 октября 2021. – Снежинск: Издательство РФЯЦ- ВНИИТФ, 2021. – 302 с. ил.
3. Щенникова Е.М., Томилов Ю.А. Моделирование работы пассивного каталитического рекомбинатора водорода в экспериментальной установке большого масштаба при нормальных условиях // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2022 по направлению инновационные ядерные технологии 23 – 24 марта 2022. – Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – 302 с. ил.
4. Тарасов О.В., Григорук Д.Г., Келлер В.Д. [и др.]. Разработка и верификация модели рекомбинаторов РВК-500, -1000 для моделирования защитной оболочки АЭС с ВВЭР методами вычислительной гидродинамики // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, вып. 3. – с. 131-136.
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.
6. Щенникова Е.М., Томилов Ю.А. Моделирование работы пассивного каталитического рекомбинатора водорода в экспериментальной установке большого масштаба при нормальных условиях // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2023, посвященная 80-летию НИЯУ МИФИ и 65-летию СФТИ НИЯУ МИФИ, по направлению инновационные ядерные технологии 31 января – 1 февраля 2023. – Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – 302 с. ил.

ПРОСТЫЕ МОДЕЛИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЙ

Хищенко К.В.[1,2,3,4]
[1]*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва*
[2]*ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», г. Долгопрудный, Московская обл.*
[3]*ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, Челябинская обл.*
[4]*ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Московская обл.*
konst@ihed.ras.ru

Дается обзор моделей термодинамики тугоплавких металлов в широком диапазоне плотностей и давлений. Основное внимание уделяется простым полуэмпирическим моделям с малым числом параметров. Даются примеры построения уравнений состояния для гафния, тантала и рения в сравнении с имеющимися данными экспериментов при высоких давлениях и удельных внутренних энергиях.

Ключевые слова: уравнения состояния, гафний, тантал, рений, ударная сжимаемость, высокие давления, высокие температуры.

SIMPLE MODELS OF THE EQUATIONS OF STATE OF REFRACTORY METALS IN A WIDE RANGE OF DENSITIES AND PRESSURES

Khishchenko K.V.[1,2,3,4]
[1]*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region*
[3]*South Ural State University, Chelyabinsk*
[4]*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow Region*
konst@ihed.ras.ru

A review of models of thermodynamics for refractory metals in a wide range of densities and pressures is given. The main attention is paid to simple semiempirical models with a small number of parameters. Examples are given of constructing equations of state for hafnium, tantalum, and rhenium in comparison with the available experimental data at high pressures and specific internal energies.

Key words: equations of state, hafnium, tantalum, rhenium, shock compressibility, high pressures, high temperatures.

Знание свойств различных материалов в широкой области термодинамических параметров является необходимым для анализа и численного моделирования физических явлений при высокой концентрации энергии [1, 2]. Тугоплавкие металлы широко используются в технологиях ядерной энергетики в качестве материалов конструкций, несущих интенсивные тепловые и механические нагрузки. В процессах взаимодействия потоков энергии с веществом термодинамические параметры состояния среды меняются в широких пределах. В частности, при этом повышение внутренней энергии может сопровождаться увеличением плотности вещества, а на стадии разгрузки плотность уменьшается вместе с внутренней энергией. Материал может претерпевать фазовые превращения, в том числе с изменением агрегатного состояния. От адекватности модели

уравнения состояния вещества зависит качественное и количественное соответствие результатов моделирования течению рассматриваемого процесса.

Последовательное описание термодинамических свойств вещества в обширной области диаграммы состояний теоретическими методами встречает серьезные трудности, связанные с необходимостью учета межчастичного взаимодействия в условиях сильной неидеальности системы [3]. Традиционным подходом к построению уравнений состояния в широком диапазоне плотностей и внутренних энергий является использование полуэмпирических моделей. При таком подходе функциональная взаимосвязь между термодинамическими величинами формулируется согласно теоретическим представлениям, а для выбора значений коэффициентов в этой функции привлекается информация из экспериментов при высоких давлениях и температурах.

Для описания свойств тугоплавких металлов (таких как гафний, тантал и рений) в широком диапазоне плотностей и давлений предложены разные полуэмпирические модели уравнений состояния с малым числом параметров. Можно выделить две группы моделей, в одной из которых определяется зависимость внутренней энергии от удельного объема и давления, а в другой — свободной энергии от удельного объема и температуры. В рамках этих моделей проводятся расчеты термодинамических характеристик металлов в условиях экспериментов по изотермическому сжатию, ударному сжатию образцов различной начальной пористости и изоэнтропическому расширению ударно-сжатых образцов. Как показывает сопоставление результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными, предложенные модели позволяют адекватно описать поведение металлов при высоких плотностях энергии.

Построенные уравнения состояния могут быть использованы при моделировании различных явлений в экстремальных условиях, в том числе в ядерных технологических процессах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, https://rscf.ru/project/19-19-00713/.

Использованные источники:

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
2. Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортов В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. – Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1988.
3. Бушман А.В., Фортов В.Е. Модели уравнения состояния вещества // УФН. – 1983. – Т. 140. – С. 177–232.

ИОНООБМЕННЫЙ СИНТЕЗ $CuCrO_2$

Черепанов М.Е. [1], Белая Е.А.[1], Колмогорцев А.М.[2]
[1] *ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск, Челябинская обл.*
[2] *ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.*
cmatve@mail.ru

Методом ионообменного синтеза получен порошок состава $CuCrO_2$, со структурой делафоссита. Однофазность продукта подтверждена методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Ключевые слова: Делафоссит, хромат меди, $CuCrO_2$, ионообменный синтез.

ION EXCHANGE SYNTHESIS OF $CuCrO_2$

Cherepanov M. E. [1], Belaya E. A. [1], Kolmogortsev A. M. [2]
[1] *FSAE IHE "Chelyabinsk State University", Chelyabinsk region*
[2] *Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region*
cmatve@mail.ru

A powder of the composition $CuCrO_2$, with the structure of delafossite, has been obtained by ion exchange synthesis. The single-phase nature of the product has been confirmed by X-ray fluorescence analysis.

Key words: delafossite, copper chromate, $CuCrO_2$, ion-exchange synthesis.

Хромат меди со структурой делафоссита представляет собой широкополосный полупроводник, обладающий сочетанием ряда уникальных свойств, таких как ширина запрещённой зоны 3,1-3,3 эВ, электропроводимость порядка 220 См/см, светопроводимость до 75% [1, 2]. В связи с этим, он нашел широкое применение в светоизлучающих и твердотельных УФ-лазерных диодах, прозрачных транзисторах для современных плоских дисплеев с активной матрицей и солнечных элементов для использования УФ-составляющей солнечного излучения.

В данной работе представлен оригинальный способ ионообменного синтеза $CuCrO_2$. В качестве ионнообменной матрицы использовали катионообменную смолу КУ-2-8 в H^+-форме. К данному катиониту добавляли растворы солей $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ и $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ и выдерживали в течение 70 минут при температуре 30°С при постоянном перемешивании. После чего катионит с адсорбированными ионами металлов промывали и сушили на воздухе в течении двух суток. Далее катионит прокаливали в муфельной печи в течении 4 часов при температуре 1000°С, используя режим теплового удара. Полученное в результате синтеза соединение исследовали методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Как видно из рис. 1 такой вариант синтеза позволяет получать однофазный продукт, на рентгенограмме идентифицируются только рефлексы, характерные для $CuCrO_2$ со структурой делафоссита.

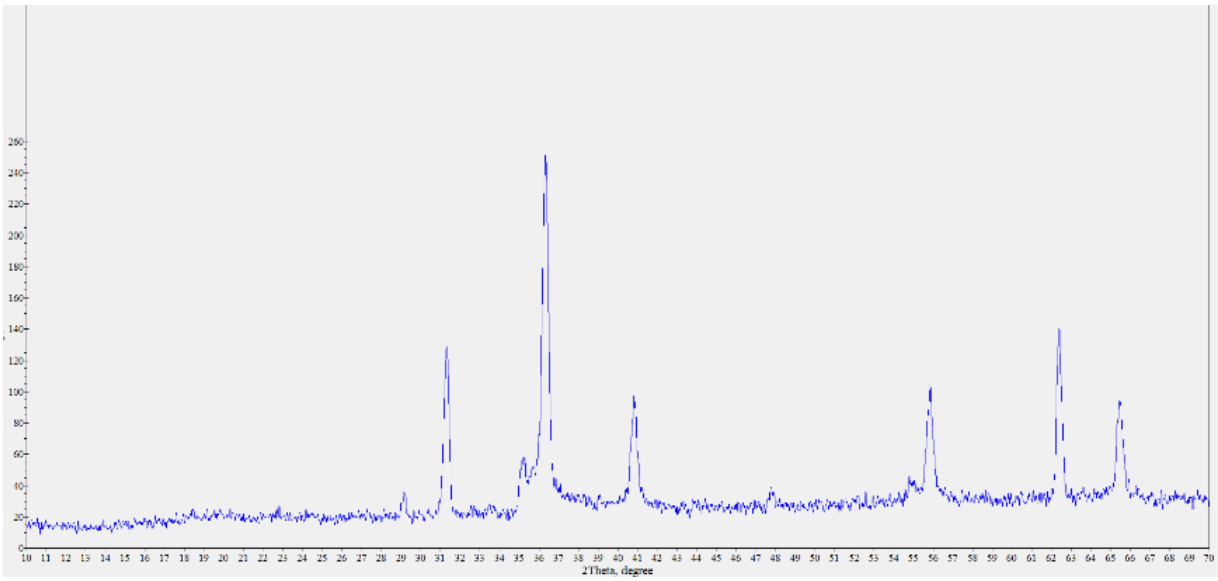


Рис. 1. Результаты РФА образцов меди, полученных ионообменным синтезом, после прокаливания в течение 4 часов при температуре 1000°С

Использованные источники:

1. Barot N. Effects of iso- and polyvalent substitutions on the short/long-range crystalline order in $CuCrO_2$ compounds / Nishant Barot, Prashant K. Mehta, Ashok Rao, Riya Thomas, Yung-Kang Kuo // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 791. – P. 134-143.
2. Tripathi T.S. Structural Optical and Electrical Transport Properties of ALD-Fabricated $CuCrO_2$ Films / T.S. Tripathi, Maarit Karppinen // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 75. – P. 488-494.

ИНИЦИИРОВАНИЕ СМЕСЕЙ ТЭНА С НАНОДИСПЕРСНЫМ АЛЮМИНИЕМ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Шишкин Н.Я.[1], Глущенко А.Г.[2], Суров М.С.[2]
[1] *ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.,*
[2] *ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.*

В работе проведена оптимизация смеси тэна с нанодисперсным алюминием для повышения чувствительности к лазерному воздействию. Определены содержание нанодисперсного алюминия в составе и плотность смеси, при которых достигается наиболее высокая чувствительность.

Ключевые слова: лазерный импульс, тэн, нанодисперсный алюминий, пороговая плотность энергии, эффективный диаметр.

INITIATION OF PETN MIXTURES WITH NANODISPERSED ALUMINUM BY NANOSECOND LASER PULSES

Shishkin N.Ya.[1], Glushchenko A.G. [2], Surov M.S.[2]
[1] *Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI*
[2] *Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Reseach Institute of Technical Physics*

The paper optimizes the mixture of PETN with nanodispersed aluminum to increase sensitivity to laser exposure. The content of nanodispersed aluminum in the composition and the density of the mixture, at which the highest sensitivity is achieved, are determined.

Keywords: laser pulse, PETN, nanodispersed aluminum, threshold energy density, effective diameter.

При проведении взрывных работ и эксплуатации изделий, содержащих взрывчатые вещества (ВВ) со средствами инициирования, особо актуальными являются вопросы безопасности. С этой точки зрения использование линии связи с детонатором, не передающей и не генерирующей ложные импульсы при аварийных инициирующих событиях, является крайне желательным. Одним из направлений, решающих такую задачу является неэлектрическое задействование детонаторов. Речь идет о световом (лазерном) задействовании детонаторов.

Основной проблемой при осуществлении прямого лазерного инициирования детонации индивидуальных ВВ является их высокая прозрачность в области большинства широко распространенных лазерных источников. В связи с этим довольно нетривиальной задачей является сенсибилизация ВВ к лазерному излучению при сохранении чувствительности (а, в идеальном варианте, флегматизации) к прочим инициирующим детонацию воздействиям.

Одним из способов повышения чувствительности ВВ к импульсу лазерного излучения является введение в объём ВВ светопоглащающих добавок. В связи с этим актуальной задачей является оптимизация параметров смесевого светочувствительного ВВ для минимизации порога его лазерного задействования.

Использование ВВ на основе тэна в конструкции лазерного детонатора является оптимальным по совокупности качеств – чувствительность, стойкость, инициирующая способность, налаженность промышленного производства.

Постановка экспериментов для исследования инициирования ВВ лазерным излучением представлена на рисунке 17.

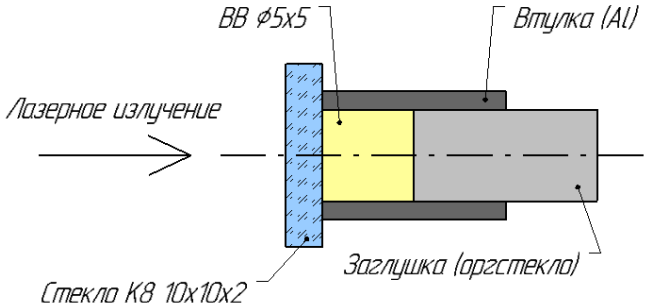


Рисунок 17 – Схема постановки экспериментов

Лазерное излучение концентрируется линзой через стеклянную подложку на поверхность исследуемого состава с ВВ, запрессованного в алюминиевую втулку заглушкой из оргстекла. Факт инициирования ВВ устанавливается по времени работы навески ВВ, а также по полному разрушению экспериментальной сборки, сопровождавшемуся характерным звуком. В каждом опыте определялась энергия лазерного импульса, воздействовавшая на навеску ВВ.

Объектами исследований являлись смеси тэна (S=5200 см^2/г) и нанодисперсного алюминия (средний размер частиц ~ 50-70 нм). Гомогенизация смеси осуществлялась ультразвуковым смешением в жидкой среде гексана.

В серии опытов определялась пороговая энергия инициирования исследуемого состава с ВВ ($E_{0,5}$). Известно, что из-за влияния большого количества факторов инициирование ВВ носит вероятностный характер. Существует область энергий, в которой наблюдаются как отказы, так и срабатывания навесок. Поэтому пороговая энергия инициирования навески ВВ ($E_{0,5}$) определялась как энергия, воздействовавшая на навеску, соответствующая 50% вероятности её подрыва в заданных условиях. Для получения значения пороговой энергии инициирования определенного состава ВВ ($E_{0,5}$) проводится серия из 8 экспериментов по методике «отказ-срабатывание» с варьированием энергии лазерного импульса.

На рисунке 2 представлен пример получаемых таким образом результатов.

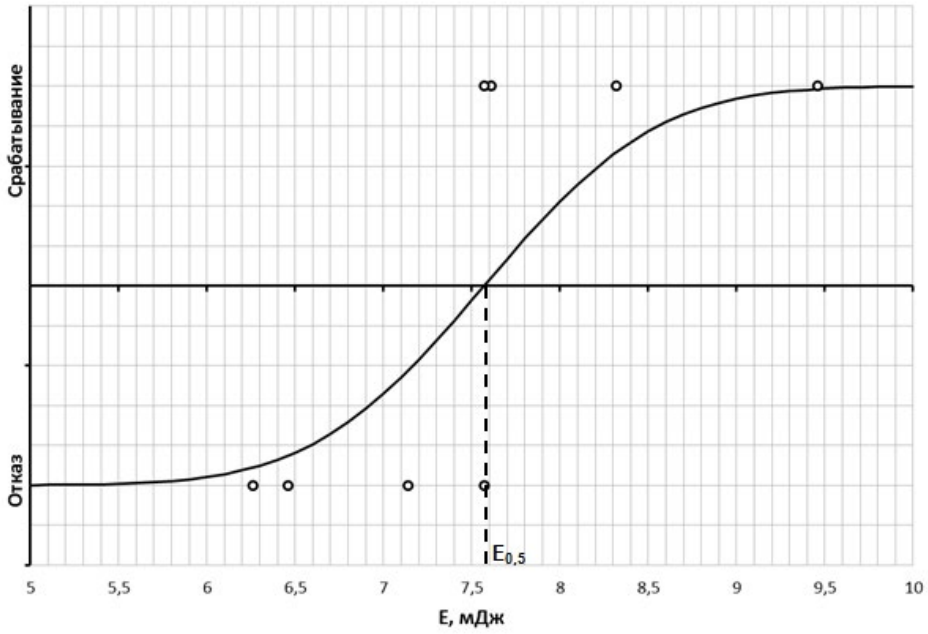


Рисунок 2 – Пример получаемых в серии опытов результатов

Длина волны лазерного излучения в опытах составляла 1064 нм, длительность импульса 7 нс (по уровню 50%), диаметр области облучения – 0,36 мм.

На графиках рисунка 3 представлена зависимость пороговой плотности энергии ($W_{0,5}$) инициирования от процентного содержания добавки при различных плотностях. Пороговая плотность энергии ($W_{0,5}$) определялась из соотношения $W_{0,5}=E_{0,5}/S$, где $E_{0,5}$ – пороговая энергия инициирования смеси, S – площадь лазерного пятна, воздействующего на ВВ ($S=\pi d^2/4$).

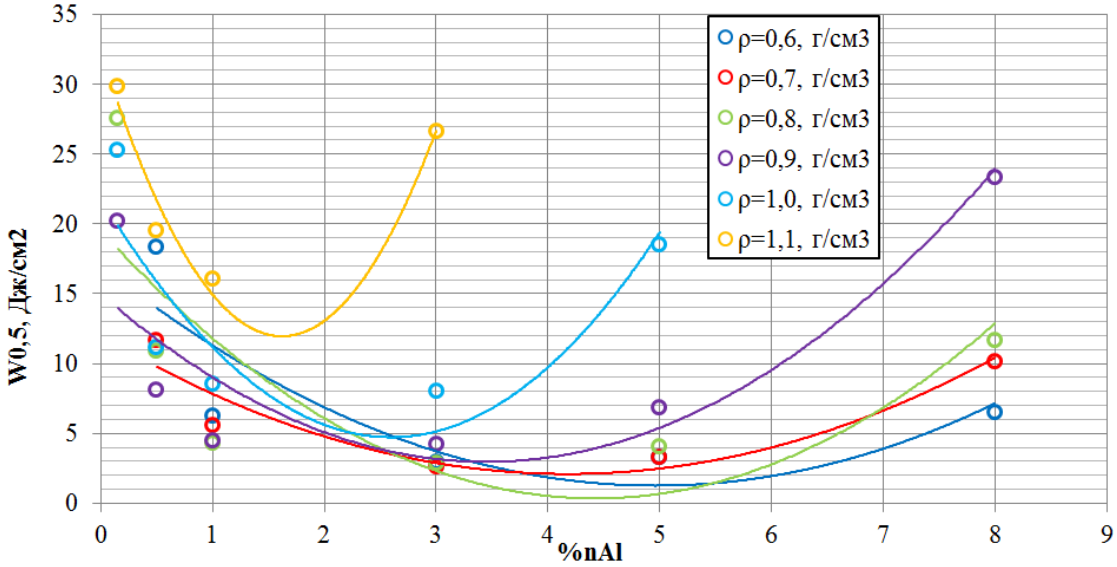


Рисунок 3 – Зависимость пороговой плотности энергии инициирования от процентного содержания добавки при различных плотностях

Анализируя данные, представленные на графиках рисунка 3, можно сделать вывод, что наибольшей чувствительностью к импульсному лазерному излучению длиной волны 1064 нм обладает смесь с плотностью 0,8 и содержанием нанодисперсного алюминия~4,5%.

Полученные в работе результаты позволили оптимизировать параметры смесевого ВВ на основе тэна и нанодисперсного алюминия для уменьшения порога его лазерного инициирования детонации.

С практической точки зрения эти данные могут быть использованы при проектировании конструкции лазерного детонатора.

Использованные источники:

1. Wynn C. M. et al. Detection of condensed-phase explosives via laserinduced vaporization, photodissociation, and resonant excitation //Applied optics. –2008. – V. 47. – №. 31. – PP. 5767-5776.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ

Шульгин А.Н., Пыхов В.В., Шахова О.А., Коробейников С.В.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
ANShulgin@mephi.ru

В данной статье приводятся основные факторы, влияющие на качество отверстий, анализ причин появления дефектов, обстоятельства, которые могут привести к массовому браку готовой продукции на производстве.

Ключевые слова: режущий инструмент, режимы резания, микрошероховатость отверстия, заточка сверла, осевая составляющая силы резания.

THE MAIN FACTORS AFFECTING ON THE QUALITY OF DRILLING HOLES

Shulgin A.N., Pykhov V.V., Shakhova O.A., Korobeynikov S.V.
Snezhinsk Physics Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk region
ANShulgin@mephi.ru

The article presents the main factors affecting of the holes quality, the analysis causes of defects, the situations that can result to a mass fault on finished production in manufacture.

Keywords: cutting tool, cutting regimes, microroughness of holes, drill sharpening, axial component of cutting force.

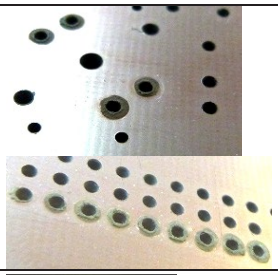
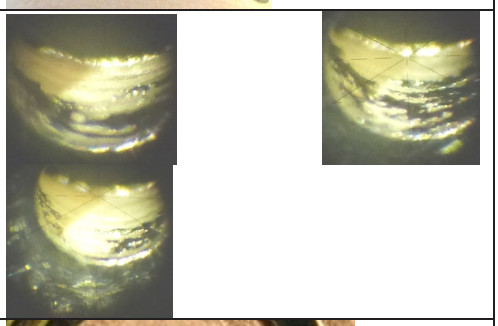
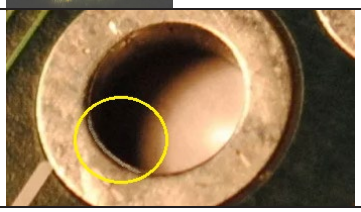
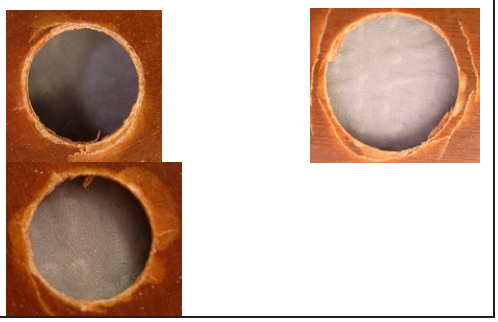
Производство печатных плат из фольгированного стеклотекстолита занимает одно из ключевых мест в приборо и радиоаппаратостроении. Технологический процесс изготовления печатных узлов относится к особо ответственным, что означает исключительную важность плат в обеспечении надежности и долговечности конечных изделий, особенно в изделиях военной техники. Стеклотекстолит поддается любым видам механической обработки, однако наиболее распространенным методом получения отверстий в условиях серийного производства является сверление на станках с помощью твердосплавного инструмента. При этом возникают сложности, связанные со слоистой структурой композиционного материала и высоким абразивным действием стеклоткани, на основе которой изготавливается материал [1 – 4].

Повышение эффективности сверления отверстий на базовом материале подразумевает системный подход и увеличение качественных и количественные показателей обработки. К количественным показателям относится общее увеличение производительности механической обработки, увеличение стойкости инструмента и сокращение количества переналадок оборудования. К основным качественным показателям можно отнести минимизацию дефектов при сверлении, а также снижение количества технологического отхода материала на отработку режимов резания.

Сверление отверстий в заготовках из стеклотекстолита позволяет получить достаточно точные поверхности. Материал обладает высокой упругостью и достаточно низкой теплопроводностью, что приводит к повышенному трению между сверлом и базовым материалом и выделению большого количества теплоты в зоне резания [5, 6]. Перегрев сверла ведет к появлению прижогов и его интенсивному изнашиванию.

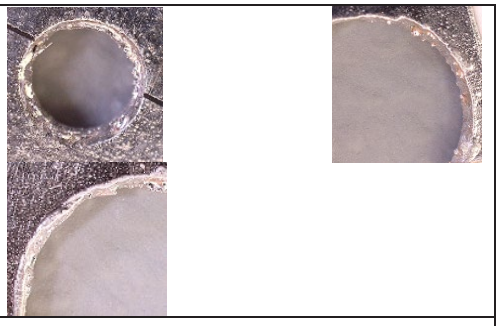
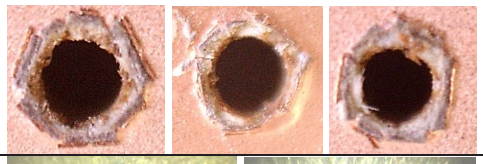
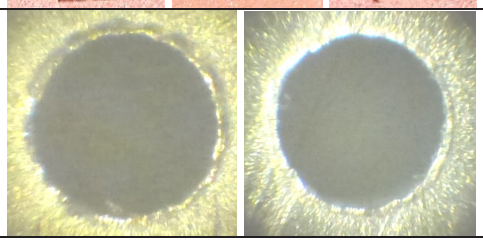
Неправильно выбранные режимы резания, использование сверл с неправильной заточкой, использование некачественных базовых материалов, в т.ч. со слишком плотным распределением филаментов стекловолокна, работа изношенным инструментом и пр. приведут к массовому браку готовой продукции на производстве. Поэтому реализация заданных требований к базовому материалу требует в каждом случае технически грамотного подхода к выбору условий и режимов резания. В табл. 1 сведены основные дефекты печатных плат, вследствие некачественного сверления с указанием основных причин их появления [7].

Таблица 1
Основные дефекты печатных плат, вследствие некачественного сверления

Описание дефекта	Причины появления	Вид дефекта
Некачественное сверление	1. Использование неправильно заточенного или не заточенного сверла. 2. Поломка сверла в процессе сверления.	
Нарушение металлизации в отверстиях	1. Выбор неправильных режимов резания, заполировка отверстия (малая подача). 2. Отсутствие микрошероховатости в отверстии, вследствие чего операция палладирования проведена не качественно.	
Наличие «ободков» вокруг металлизированного отверстия	1. Работа затупленным сверлом. 2. Выбор неправильных режимов резания.	
Посветления материала на входе и выходе сверла, выкрашивание материала	1. Выбор неправильных режимов резания: сверло давит, а не режет. 2. Не правильная заточка или поломка сверла.	

Окончание табл. 2

Описание дефекта	Причины появления	Вид дефекта
Излишняя шероховатость в отверстии	1. Не правильный подбор инструмента; 2. Режимы резания не обеспечивают качественной обработки.	

		
Расслоение базового материала на выходе сверла	1. Использование неправильно заточенного или не заточенного сверла. 1. Превышение силы резания над адгезией связующего с армирующим волокном	
Наличие заусенцев в отверстиях печатной платы более 40 мкм	1. Выбор неправильных режимов сверления (подача, скорость вращения шпинделя). 2. Работа тупым инструментом. 3. Отсутствие технологических подкладок на входе и выходе заготовки.	

Анализ причин появления дефектов проведен на основании практических данных, в результате отработки методик сверления при переходе на новую линейку режущего инструмента [8 – 9].

Очевидно, что наряду с выбором базового материала, основными факторами, влияющими на качество обработки отверстий, является выбор оптимальной геометрии режущего инструмента и назначение правильных режимов резания [10].

Использованные источники:

1. Okutan, E. Research on obtaining parametric equations of cutting force when drilling glass fiber composites / E. Shrouded [et al.] // Construction Bulletin. Journal of Mechanical Engineering, 59(2), 2013, pp. 97-105.
2. Rakhamatulla I., Shunmugam M.S., 2013, Analysis of the efforts and quality of holes during micro-drilling of layered carbon fabric composites, Journal of Composite Materials, 47/9:1129-1140.
3. Rakhmatulla I., Shunmugam M.S., 2014, A mechanistic approach to predicting forces during micro-drilling of simple and glass-reinforced epoxy sheets, Int J Adv Manufacturing Technol, 75, pp. 1177-1187.
4. Rakhamatulla, I., Shunmugam, M.S., 2011, Thrust and torque analysis for various strategies adapted for micro-drilling of fiberglass with forced glass fiber processing, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Production, 225:505-519.
5. Rakesh, P.K. Drilling of composite layered materials with the geometry of solid and hollow drilling points / P.K. I. Rakesh, I. Singh, D. Kumar // Journal of Composite Materials. 46 (25), 2012, pp. 3173-3180.
6. Singh, I. Drilling unidirectional composite laminates made of fiberglass reinforced plastic (UDGFRP) / I. Singh, N. Bhatnagar // International Journal of Mechanical Tools and Manufacturing, 27, 2006, pp. 870-876.
7. 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.

8. 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
9. 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.
10. Zhang L.B., Wang L.J., Liu H.Yu., 2001, Mechanical model for predicting critical thrust forces when drilling composite layered materials, Materials of the Institute of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215: pp. 135–146.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКОМБИНАЦИИ ВОДОРОДА НА КАТАЛИТИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ В ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТАЛЬНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА

Щенникова Е.М.[1,2], Томилов Ю.А.[1,2]
[1]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.,
[2] ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.
shchennikovaem@vniitf.ru

Проведено численное моделирование рекомбинации водорода на каталитических стержнях в испытательной камере. При моделировании использовался детальный кинетический механизм. В результате проведения расчета были получены поля параметров смеси, а также зависимости объемной доли водорода в камере и температур стержней для сравнения с данными опыта. Модель удовлетворительно описывает каталитическое окисление водорода. Отмечена необходимость проведения дополнительных расчетов для различных условий для более надежной верификации модели.

Ключевые слова: катализатор, кинетический механизм, рекомбинация водорода, CFD-моделирование, водород, водородная безопасность, испытательная камера.

SIMULATION OF HYDROGEN RECOMBINATION AT CATALYTIC RODS IN TESTING CHAMBER USING DETAILED CHEMISTRY MECHANISM

Shchennikova E.M. [1,2], Tomilov Y.A.[1,2]
[1] FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia
[2]FSAEE HE «Snezhinsk physicotechnical institute of National research nuclear university MEPhI», Snezhinsk, Russia
shchennikovaem@vniitf.ru

Numerical simulation of hydrogen recombination at catalytic rods in testing chamber using detailed chemistry mechanism is performed. Parameter fields of mixture ware obtained, as well as relationships of hydrogen mole fraction in chamber and rods temperature for comparison in comparison with experiment data. The model adequately describes catalytic hydrogen combustion. Necessity of additional simulations conduction under different conditions is noted for more reliable model verification.

Keywords: catalyst, chemistry mechanism, hydrogen recombination, CFD-simulation, hydrogen, hydrogen safety, testing chamber.

Цель расчетов – подбор физико-химической модели, удовлетворительно описывающей каталитическое окисление водорода; уточнение теплофизических свойств стержней; оценка возможности моделирования работы каталитического блока с использованием детального кинетического механизма.

Задачи расчета:

– проведение расчета с использованием детального кинетического механизма окисления водорода на платине;

– определение зависимости объемной доли водорода в камере от времени, температуры в контрольных точках от времени;

– сравнение с экспериментальными данными.

Постановка расчета.

В центре сферической испытательной камеры, заполненной водородо-воздушной смесью с объемной долей водорода 6,85 %, на подставке вертикально располагается семь каталитических стержней. Условия среды – нормальные. В верхней части камеры производится отбор газовых проб, термопары расположены на поверхности стержней.

Описание физико-химической модели.

В системе уравнений сохранения учитывается вязкостное трение и сила тяжести. С помощью уравнения состояния идеального газа вычисляется плотность газовой смеси. Динамическая вязкость и теплопроводность, коэффициенты диффузии рассчитывались с помощью молекулярно-кинетических соотношений, теплоемкость задавалась как термодинамический полином от температуры. Для стержней и подставки решаются уравнения сохранения энергии. Между всеми областями моделируется теплопередача.

На внутренних границах корпуса установки скорость равна нулю. На внешних границах корпуса моделируется теплоотдача в окружающую среду, при этом учитывается термическое сопротивление корпуса камеры.

Для моделирования химических реакций в газовом объеме в уравнениях сохранения массовой доли каждого компонента газовой смеси и уравнении сохранения энергии появляются дополнительные источниковые члены. Модель химических взаимодействий между различными компонентами смеси, а также взаимодействий между газовой средой и каталитической поверхностью задается в соответствии кинетическими механизмами [1, 2].

Каталитический стержень сделан из алюмооксидной керамики, покрытой платиной. Теплофизические свойства стержня получены при исследовании отдельных образцов в РФЯЦ-ВНИИТФ, а также взяты из литературы [3].

Результаты расчетов.

Полученные в расчете поля различных величин показывают, что с самого начала расчета у поверхности стержней начинается удаление водорода, кислорода и генерация водяного пара, а также промежуточных радикалов. Происходит энерговыделение, вследствие чего стержни и окружающий газ нагреваются, что вызывает естественную конвекцию водородо-воздушной смеси в испытательной камере.

Возникший у поверхности стержней пар, смешиваясь с водородо-воздушной смесью, поднимается в верхнюю часть камеры, где происходит отбор проб, и смесь, охлаждаясь у стенок камеры, опускается вниз. При этом к стержням снизу подходят свежие порции водородо-воздушной смеси. С ростом температуры стержней скорость конвективного потока в камере нарастает, и так продолжается до тех пор, пока концентрация водорода в свежих порциях не начнет снижаться из-за процесса сжигания водорода на стержнях. Вслед за снижением объемной доли водорода в свежих порциях начинается снижение температуры стержней и, следовательно, скорости конвективного потока.

Отмечается, что каталитические стержни прогреваются неравномерно. Так, температура центрального стержня более чем на 100 К меньше температуры боковых стержней, так как свежие порции водорода окисляются на внешней поверхности боковых стержней, а водород между ними и центральным стержнем практически полностью выгорает. По той же причине боковые стержни имеют неоднородность по радиусу. Также все стержни обладают неоднородностью температуры по высоте.

Как видно из рисунка 1, результаты расчета близки к экспериментальным данным и качественно повторяют характер изменения объемной доли водорода в эксперименте. В первые секунды значение объемной доли водорода резко снижается, что связано с возникновением естественной конвекции и приходом в верхнюю часть камеры первой значительно обедненной водородом газовой смеси, после чего течение в камере устанавливается, и снижение объемной доли водорода приобретает монотонный характер. Расчетные зависимости температур стержней (рисунок 2) качественно повторяют экспериментальные зависимости, и достаточно близки по абсолютным значениям.

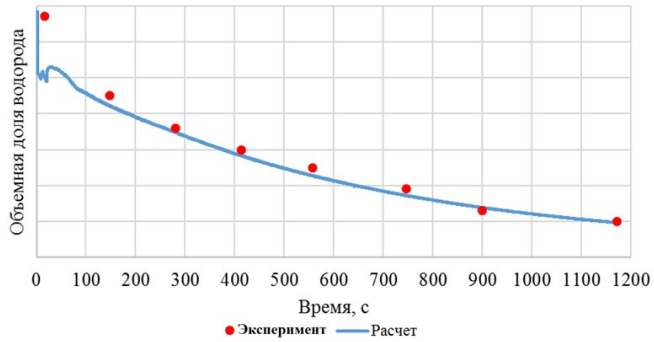


Рисунок 1 – Зависимость объемной доли водорода в месте отбора проб

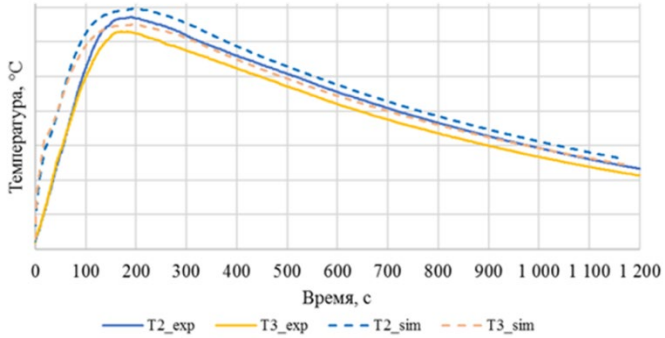


Рисунок 2 – Зависимость температуры в контрольных точках на стержнях

Таким образом, получена физико-химическая модель, удовлетворительно описывающая каталитическое окисление водорода. Для моделирования использовались свойства стержней, полученные в исследованиях отдельных образцов совместно с литературными данными. Хорошее совпадение с результатами эксперимента, в частности, по температуре стержней в контрольных точках, позволяет судить о правильности подбора теплофизических свойств для моделирования. Эти данные в дальнейшем можно использовать при упрощенном моделировании рекомбинатора.

Ввиду высокой длительности счета был проведен расчет только для одного набора начальных условий. Целесообразным представляется проведение расчетов в данной постановке для различных условий, соответствующих условиям экспериментов для более надежной верификации модели.

Данная модель позволяет проводить расчеты процессов рекомбинации водорода для исследования характеристик рекомбинатора, но в масштабах одного или нескольких каналов рекомбинатора, вследствие ее большой ресурсоемкости.

Использованные источники:

1. Saxena P., Williams F.A. Testing a small detailed chemical-kinetic mechanism for the combustion of hydrogen and carbon monoxide // Combustion and Flame. – 2006. № 145(1-2). – P. 316-323.
2. Hellsing B., Kasemo B., Zhdanov V. P. Kinetics of the hydrogen-oxygen reaction on platinum // Journal of Catalysis. – 1991. – № 132. – P. 210-228.
3. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов – Минск: Наука и техника, 1971. – 114 с.

ТРЁХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Юсупов Ю.Ф.[1,2] , Глазырин И.В.[1,2] , Говрас Е.А.[1] , Михайлов Н.А.[1] , Титова А.М.[1] , Чижков М.Н. [1]
[1]*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.,*
[2] *ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», г. Снежинск, Челябинская обл.*
yu.f.yusupov@vniitf.ru

Для расчёта поглощения лазерного излучения веществом в приближении геометрической оптики в трёхмерную газодинамическую программу добавлен численный метод для моделирования распространения излучения в среде. Реализованы процесс отражения лучей от поверхности критической плотности и рефракция. Модель поглощения основана на обратно-тормозном механизме.

Численный метод верифицирован на одномерной и двумерной задачах, которые имеют аналитическое решение. Для анализа экспериментальных данных, полученных в Центре Лазерно-Физических Исследований РФЯЦ-ВНИИТФ, проведены трёхмерные численные расчёты.

Ключевые слова: приближение геометрической оптики, обратно-тормозное поглощение, трассировка, критическая плотность электронов, рефракция, верификация, анализ экспериментальных данных.

3D NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION OF LASER RADIATION WITH MATTER IN THE GEOMETRIC OPTICS APPROXIMATION

Yusupov Yu.F.[1,2] , Glazyrin I.V.[1,2] , Govras E.A.[1] , Mikhailov N.A.[1] , Titova A.M.[1] , Chizhkov M.N. [1]
[1]FGUP "RFNC-VNIITF im. Academ. E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region,
[2] Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region.
yu.f.yusupov@vniitf.ru

To calculate the absorption of laser radiation by a substance in the geometrical optics approximation, a numerical method has been added to the three-dimensional gas-dynamic program for modeling the propagation of radiation in a medium. The process of reflection of rays from the surface of critical density and refraction are realized. The absorption model is based on a reverse-braking mechanism.

The numerical method has been verified on one-dimensional and two-dimensional problems that have an analytical solution. To analyze the experimental data obtained at the Center for Laser Physics Research RFNC-VNIITF, three-dimensional numerical calculations were carried out.

Key words: geometrical optics approximation, bremsstrahlung, tracing, critical electron density, refraction, verification, experimental data analysis.

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 от поверхности критической плотности.

Модель включает следующие аспекты:

- траектория луча внутри ячейки является прямолинейной;
- учитывается преломление и отражение каждого луча в пучке от ячеек с критической электронной плотностью, то есть когда частота падающего излучения совпадает с плазменной;
- лазерный пучок формируется в произвольной области, даже вне расчетной сетки, с помощью двух формирующих эллипсов на прямоугольной сетке;
- используется однотемпературное приближение с определением среднего атомного заряда и веса вещества с помощью табличных значений;
- имеется возможность работы программы на общей и распределенной памяти, формирование лазерного пучка возможно на декомпозированной сетке.

За основу механизма формирования лазерного пучка взят подход, аналогичный подходу в программе FLASH [6]. Такой метод позволяет задавать произвольный угол падения излучения и моделировать сходящийся (сфокусированный) пучок. Форма пучка задаётся двумя эллипсами – испускающим и принимающим (см. рисунок 1, слева). Эллипсы могут различаться по размерам, но всегда имеют одинаковое соотношение полуосей. Область внутри эллипса разбивается на дискретное число лучей, для каждого из которых определяются направление движения и точка входа в границу системы.

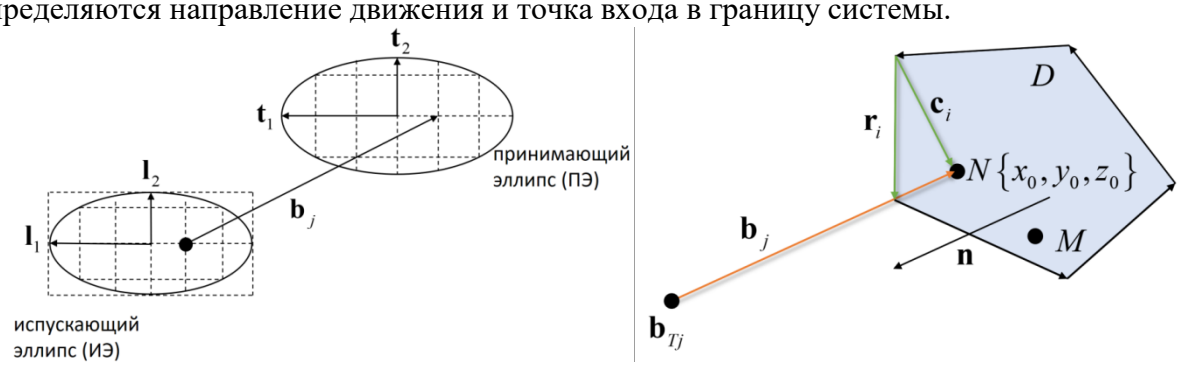


Рисунок 1 – Построение лазерного пучка и определение точки входа лучей в систему

Суммарная энергия пучка Q вычисляется по формуле

$$Q(t)=\int_{t_0}^{t}P(t')dt'\approx\sum_{t_0}^{t}\frac{P(t_{i+1})-P(t_i)}{2}(t_{i+1}-t_i), \qquad (1)$$

где $P(t)$ – функция распределения мощности пучка (изотропное, гауссово или супергауссово). Величина энергии пучка за один временной шаг определяется методом трапеций:

$$Q_n=\frac{P(t_{i+1})-P(t_i)}{2}(t_{i+1}-t_i)=\sum_{j=0}^{N_{лучей}}q_j. \qquad (2)$$

Потеря энергии j-го луча зависит от пройденного расстояния внутри ячейки l_i

$$q_j=q_{j0}\cdot e^{-K_i^{ОТП}l_i}. \qquad (3)$$

Здесь $K_i^{ОТП}$ – коэффициент обратно-тормозного поглощения, который определяется как:

$$K^{ОТП}=\frac{\sqrt{2}\omega}{c}\sqrt{1-\xi}\left\{\sqrt{1+\left(\frac{v_{ei}}{\omega}\frac{\xi}{1-\xi}\right)^2}-1\right\}^{1/2}, \quad \xi=\frac{\omega_p^2}{\omega^2}=\frac{n_e}{n_{cr}} \qquad (4)$$

Здесь ω – круговая частота лазерного излучения, ω_p – плазменная частота, 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 или ячейки с критической плотностью.

Модель поглощения лазерного излучения состоит из нескольких этапов. На этапе задания начальных данных запускается генерация лазерного пучка, которая включает в себя задание геометрии пучка, распределение энергии между лучами, а также нахождение точек входа каждого луча в расчётную область.

В начале временного шага в ячейках определяются средний атомный вес, средний заряд, электронная плотность, кулоновский логарифм, частота электрон-ионных соударений и коэффициент обратно-тормозного поглощения. На гранях ячеек вычисляется изменение нормальной составляющей скорости для входящих лучей. Для определения полной энергии пучка используется линейная интерполяция по заданному табличному распределению.

Следующим этапом является трассировка лучей исходя из направления движения каждого луча. После прохождения ячейки пересчитывается энергия луча и обновляется его направление движения из-за наличия преломления на грани между двумя ячейками. В конце временного шага выполняются этапы газодинамики и теплопроводности.

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. В дальнейшем планируется тестирование реализованной модели на экспериментальных данных ЦЛФИ РФЯЦ-ВНИИТФ.

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. Leibrandt 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 трехмерной программе ФОКУС // // ЖВМиМФ. – 2021. – 61, 6, – С.1019.

6 Dubey et al, Evolution of Flash, a Multiphysics Scientific Simulation Code for High Performance Computing // High Perform. – 2014. P. 337-348.

7 Thomas B. Kaiser. Laser ray tracing and power deposition on an unstructured three-dimensional grid // PHYSICAL REVIEW E. – 1999. P. 219-240.

Алфавитный указатель авторов

	Стр.
Абраменко И.А.	7
Баутин С.П.	10, 47
Безгодов Е.В.	130
Белая Е.А.	141
Бобылев А.В.	87
Болдырев М.И.	12
Боярских К.А.	16
Бугаенко А.А.	18
Васильев А.П.	27
Веселова Н.Н.	78
Водолага Б.К.	27
Волосенко К.С.	20
Волошин Н.П.	27
Глазырин И.В.	12, 153
Глущенко А.Г.	143
Гнеушев Н.В.	23, 25
Говрас Е.А.	153
Горбатов А.Д.	23, 25
Горбатов И.В.	25
Горин Н.В.	27
Декусар В.М.	27
Дьячков М.Р.	32, 35
Ежов Р.А.	94
Ена В.А.	87
Захарова О.О.	38
Ибрагимов Я.О.	23
Исупова А.А.	41
Казаков И.А.	23, 25
Казачинский А.О.	45
Карелина О.А.	10, 47
Каримов В.А.	23, 25
Кириллов И.А.	12
Козлов А.В.	87
Колмогорцев А.М.	141
Середкин Н.Н.	114
Симоненко В.А.	12, 116
Скрябин С.Н.	105, 126
Стаханов В.В.	130
Степанов И.Ю.	133
Суров М.С.	143
Тараканов А.А.	130
Титова А.М.	153
Томилов Ю.А.	136, 150
Федоров А.А.	87

	Стр.
Кононов С.Н.	53
Коробейников К.А.	133
Коробейников С.В.	146
Котова О.Г.	12
Крутова И.Ю.	18, 55
Кузнецов Е.В.	27
Кучинов В.П.	27
Лебедев С.Н.	78
Левунина Э.С.	57
Логутов К.Д.	59
Лушина Ю.Ю.	100
Машкин А.Н.	62, 71
Минаев И.В	133
Мирошкин З.К.	94
Михайлов Н.А.	12, 153
Моисеев А.В.	27
Мустафин А.М.	78
Нагорнов А.А.	87
Никульшин М.В.	133
Обухов А.Г.	10, 47
Опрышко О.В.	92
Орлов Ю.А.	25
Орлова Н.Ю.	94, 96
Паршукова Н.Ю.	100, 103
Пасюков С.Д.	130
Певнева Н.А.	103
Петрова Ю.А.	105, 126
Пильщиков А.А.	94
Полеев В.Г.	20
Понькин Е.И.	108
Попов И.А.	130
Пыхов В.В.	146
Садовский А.А.	111
Садыков Н.Р.	105, 126
Хищенко К.В.	16, 114, 139
Черепанов М.Е.	141
Чижков М.Н.	12, 153
Шахова О.А.	146
Шидловский В.В.	27
Шишкин Н.Я.	23, 25, 100, 143
Шульгин А.Н.	146
Щенникова Е.М.	136, 150
Юсупов Ю.Ф.	12, 153
Яковлев С.А.	130

ОРГАНИЗАЦИИ

Российская Академия наук

ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН», Москва
ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН», Черноголовка, Московская обл.

Учебные организации

ГБОУДО «Дворец творчества детей и молодежи имени А.П. Гайдара», Москва
ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)», Долгопрудный, Московская обл.
ФГАОУ ВО «Национальный Исследовательский ядерный университет МИФИ», Москва
ФГАОУ ВО «Новоуральский технологический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Свердловская обл.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
ФГАОУ ВО «Технологический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Лесной, Свердловская обл.
ФГАОУ ВО «Трехгорный технологический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
ФГАОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Тюменская обл.
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, 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

АО «Государственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Обнинск, Калужская обл.
АО «Гринатом», Москва
АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля», Москва
АО «Прорыв», Москва
НИЦ «Курчатовский Институт», Москва
ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская обл.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

Оргкомитет Всероссийской конференции
«Заседания тематических секций Научной сессии НИЯУ МИФИ
по направлению «Инновационные ядерные технологии»,
СФТИ НИЯУ МИФИ, 23-34 марта 2022 года

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:
Симоненко В.А., - зам. научного руководителя ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», д.ф-м.н., профессор (по согласованию)

СОПРЕДСЕДАТЕЛЬ:
Линник О.В., руководитель СФТИ НИЯУ МИФИ, к.и.н., доцент

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА:

Баутин С.П., профессор каф. высшей и прикладной математики СФТИ НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н.

Зуев Ю.С., зав. кафедрой технической механики СФТИ НИЯУ МИФИ, к.т.н., доцент

Колмогорцев А.М., зав. кафедрой общей физики СФТИ НИЯУ МИФИ, к.х.н.

Крутова И.Ю., зав. кафедрой высшей и прикладной математики СФТИ НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н., доцент

Орлов А.А., доцент кафедры технологии машиностроения СФТИ НИЯУ МИФИ, к.т.н.

Орлова Н.Ю., зав. кафедрой технологии машиностроения СФТИ НИЯУ МИФИ, к.т.н., доцент

Певнева Н.А., нач. Центра информационного, библиотечного обслуживания и издательской деятельности СФТИ НИЯУ МИФИ

Садовский А.А., доцент кафедры экономики и управления СФТИ НИЯУ МИФИ, к.т.н.

Садыков Н.Р., профессор кафедры общей физики СФТИ НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н.

Статьи сборника публикуются в авторской редакции

Оригинал-макет изготовлен Н.А. Певневой

Подписано в печать 22.03.2023. Формат 60x84 1/16
Тираж 100 экз.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское ш., 31.
Издательско-полиграфический отдел СФТИ НИЯУ МИФИ.
456776, Снежинск, Комсомольская, 8