



# НАУЧНЫЙ СЕМИНАР

АСПИРАНТСКИЕ ЧТЕНИЯ СФТИ НИЯУ МИФИ

Сборник трудов

СФТИ НИЯУ МИФИ  
16-17 мая 2024 г.

УДК 082  
А 90

АСПИРАНТСКИЕ ЧТЕНИЯ СФТИ НИЯУ МИФИ – 2024. Сборник трудов научного семинара. 17 -1 8 мая 2024 г. - М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2024. – 155 с.

Основные задачи научного семинара – привлечение аспирантов к решению актуальных задач, развитие научной активности, оптимизация научно-исследовательской работы, содействие в создании междисциплинарных проектов и получения научно-методической помощи молодым ученым в подготовке и написании диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

В ходе работы семинара аспиранты представили актуальность, цели, задачи, новизну, теоретическую и практическую значимость своих исследований, а также имеющиеся на настоящий момент наиболее важные результаты.

ISBN 978-5-7262-3094-8, изд. № 021-2.

© Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, 2024

АЛГОРИТМ ДВУМЕРНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ В ФОРМАЛИЗМЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ <b>Балашов Н.М., Майер А.Е.</b>	6
АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ НАДЕЖНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА <b>Брегеда А.И., Липатов А.Н.</b>	12
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ <b>Вазиева И.А.</b>	20
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ ИНЖЕНЕРНОМ ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ЯРУС-И <b>Валиуллин И.Р., Милицина Т.С.</b>	22
РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ РЕАКЦИИ СБИС НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ АМПЛИТУДНО - ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНО – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК <b>Грядобитов В.С.</b>	26
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА <b>Данилов Н.Е., Гаврилов Д.С.</b>	37
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУНКЦИЕЙ ПОТЕРЬ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ОДНОМЕРНОМ СЛУЧАЕ <b>Исупова А.А., Теплых Н.А.</b>	43
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ <b>Карелина О.А.</b>	53
ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ КАПРОЛОНА <b>Кушнир П.О., Шульгин А.Н., Кушнир О.С.</b>	60

МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ХОДЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА <b>Латыпов А.А., Лебедев С.Н., Овечкин А.А.</b>	66
РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПО БИО-САВАРУ- ЛАПЛАСУ В ПЛОСКОЙ ТОКОНЕСУЩЕЙ СИСТЕМЕ «ФЛАЕР – ОБРАТНЫЙ ТОКОПРОВОД» <b>Лубенченко Н.А., Григорьев А.Н.</b>	88
ГЕНЕРАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНЫХ СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ <b>Минаев А.С.</b>	97
ПРИМЕНЕНИЕ УЛУЧШЕННОГО АЛГОРИТМА SWINGING DOOR В СЕНСОРНОЙ СЕТИ УМНОГО ГОРОДА <b>Михайлов А.Ф.</b>	100
РАСЧЕТ СМЕШАННЫХ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ SINARA <b>Мустафин А.М., Лебедев С.Н.</b>	106
АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ ПУЗЫРЬКОВ ФЛОТАЦИОННОЙ ПЕНЫ <b>Пыхов В.В.</b>	115
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ, СНИЖАЮЩЕГО ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ О ПРЕГРАДУ <b>Степанов И.Ю.</b>	122
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т <b>Столбиков А.А.</b>	129
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВОЗДУХА ТИПА ТОРНАДО <b>Тютюник А.М.</b>	136
ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗЯТЦ <b>Файрушина Л.Р., Макеева И.Р.</b>	138



ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ С УЧЕТОМ РЕФРАКЦИИ И ОТРАЖЕНИЯ <b>Юсупов Ю.Ф.</b>	141
ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДАМБ ДРАЖНЫХ КОТЛОВАНОВ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ <b>Ярушин К. М.</b>	146
Алфавитный указатель авторов	155

## АЛГОРИТМ ДВУМЕРНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ В ФОРМАЛИЗМЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

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

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

<sup>2</sup>*ФГАОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск,  
Челябинская обл.*

[nikita184@yandex.ru](mailto:nikita184@yandex.ru)

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

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

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

<sup>2</sup>*Chelyabinsk State University,  
Chelyabinsk, Chelyabinsk region*

[nikita184@yandex.ru](mailto:nikita184@yandex.ru)

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

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

Two-dimensional dislocation dynamics allows one to estimate flow stresses for regions of a material containing tens of thousands of dislocations based on equations that describe the motion of single dislocations and their interaction with precipitates

of strengthening phases. In this work, the algorithm for two-dimensional dislocation dynamics is generalized to the case of finite deformations. The results of calculations of flow stress for pure aluminum are presented depending on the strain rate and dislocation density.

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

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

При помощи разработанного алгоритма проводится численное моделирование процесса деформации и динамики дислокаций, чтобы определить зависимость между плотностью дислокаций и скоростью деформации, которую они могут скомпенсировать. Моделируется квадратная область со стороной 15 мкм. Область аппроксимируется сеткой  $50 \times 50$  ячеек. На границах заданы периодические граничные условия. В начальный момент времени во всех узлах задан вектор скорости  $\vec{v} = (\dot{\epsilon} * y_{node})$ , где  $\dot{\epsilon}$  – скорость

деформации,  $U_{node}$  – высота ячейки. Скорость узлов на границе остается постоянной в ходе всего моделирования. В области распределены дислокации по равномерному закону. Для каждой дислокации случайным образом задано направление вектора Бюргерса. В начальный момент времени дислокации имеют нулевую скорость. Моделирование проводилось до  $4.73 \times 10^{-1} \text{нс}$  с постоянным временным шагом. Результаты моделирования с постоянным числом дислокаций представлены на рисунках 1 и 2. Анализируя результаты моделирования для двух различных плотностей дислокаций (рис. 1 и 2), можно отметить, чем больше плотность дислокаций, тем большие деформации можно компенсировать и процесс компенсации происходит быстрее.

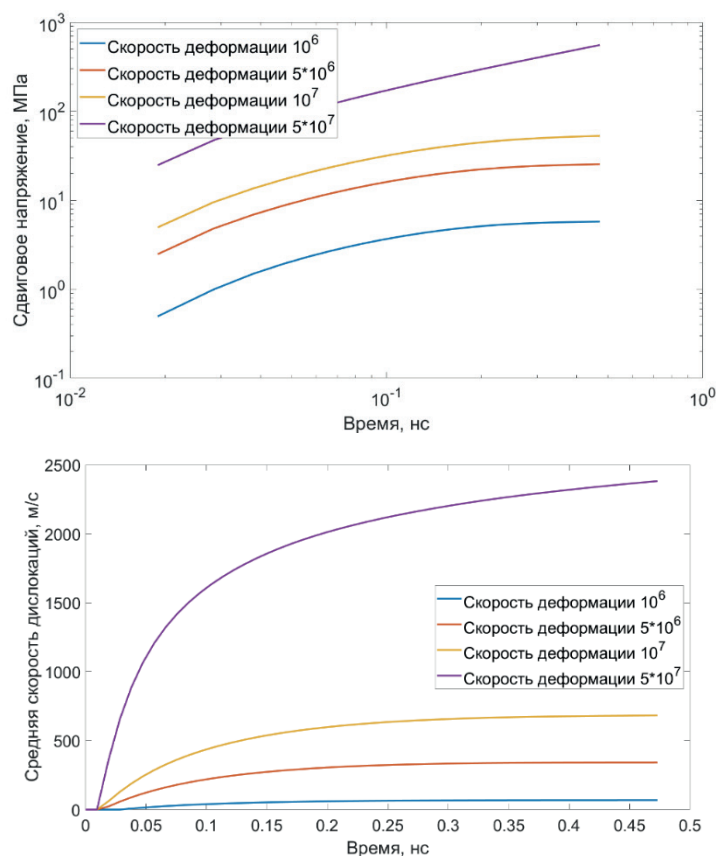


Рисунок 1. Зависимость сдвигового напряжения (сверху) и средней скорости дислокаций (снизу) от времени для различных скоростей деформаций при плотности дислокаций  $10^{14} \text{м}^{-2}$ .

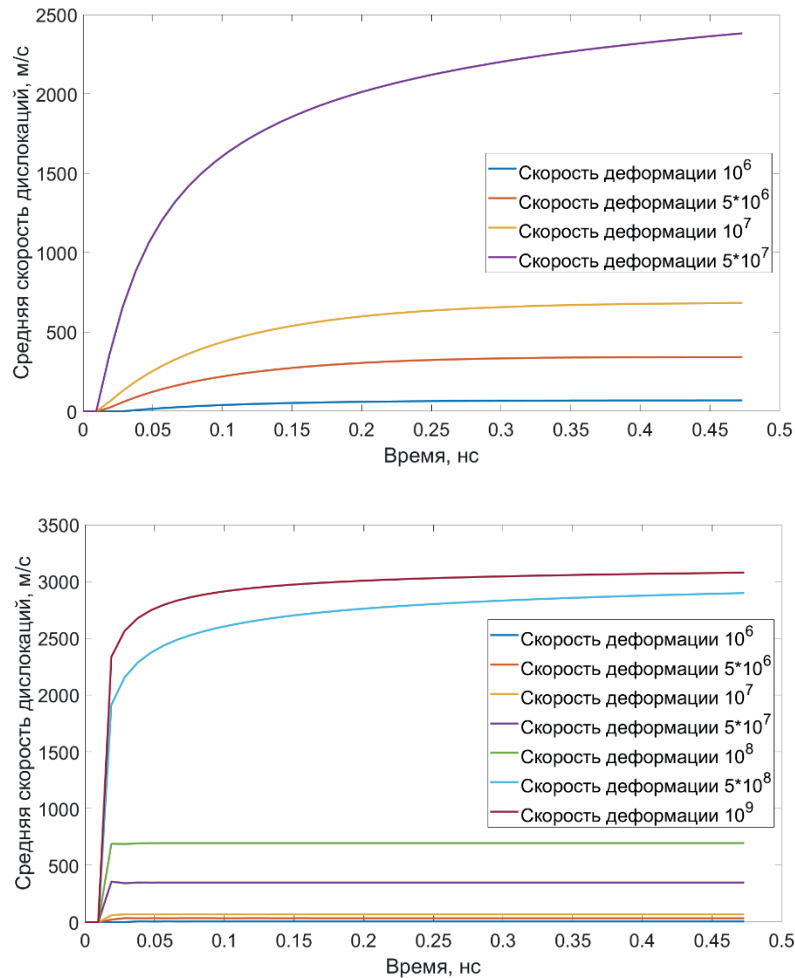


Рисунок 2. Зависимость сдвигового напряжения (сверху) и средней скорости дислокаций (снизу) от времени для различных скоростей деформаций при плотности дислокаций  $10^{15} \text{ м}^{-2}$ .

В ходе моделирования дислокации рождаются и аннигилируют. Пластические силы совершают работу. Часть работы тратится на нагрев, другая на рождение дислокаций. Согласно [5], на рождение дислокаций приходится 10% процентов работы. Для рождения дислокации необходимо затратить энергию равную  $8 \text{ эВ}/b$ , где  $b$  – вектор Бюргера.

В ходе эволюции дислокации могут аннигилировать. Для этого их плоскости скольжения должны быть параллельными, а вектора Бюргера иметь разные знаки. Принято предположение, что дислокации аннигилируют, когда они находятся в одной ячейке и между ними расстояние менее  $10b$ , где  $b$  – вектор Бюргера.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты моделирования с рождением и аннигиляцией дислокаций. В отличие от результатов на рисунках 1 и 2 мы видим, что механизм рождения дислокаций приводит к компенсации больших деформаций.

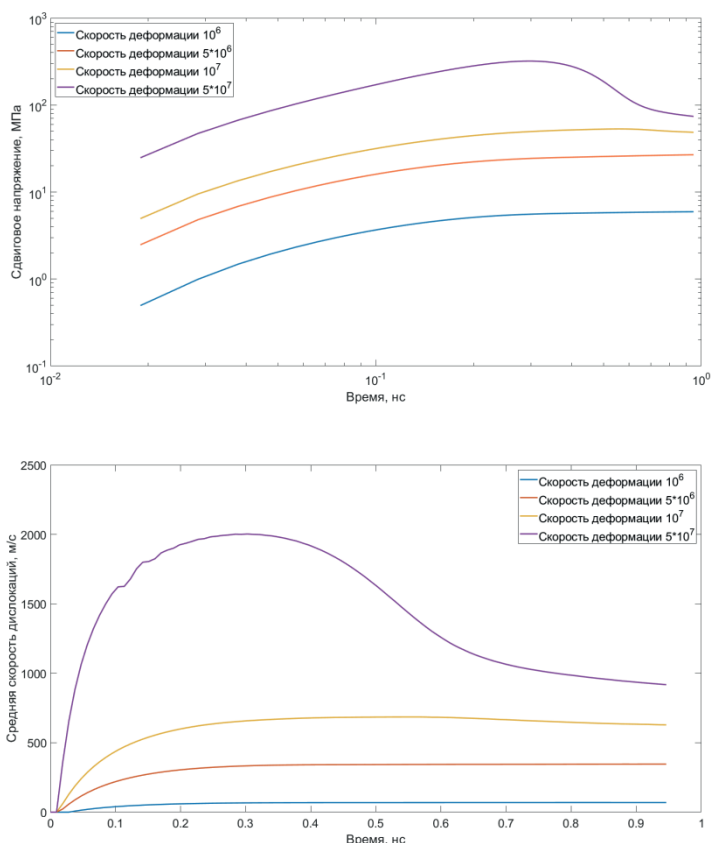
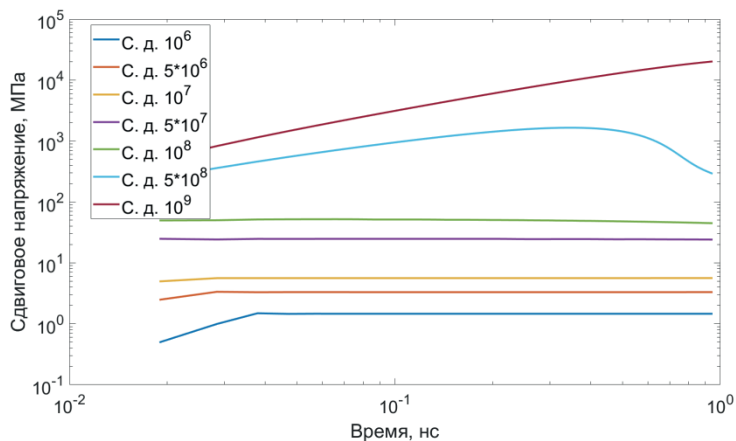


Рисунок 3. Зависимость сдвигового напряжения (сверху) и средней скорости дислокаций (снизу) от времени для различных скоростей деформаций при плотности дислокаций  $10^{14} \text{ м}^{-2}$  с рождением и аннигиляцией дислокаций.



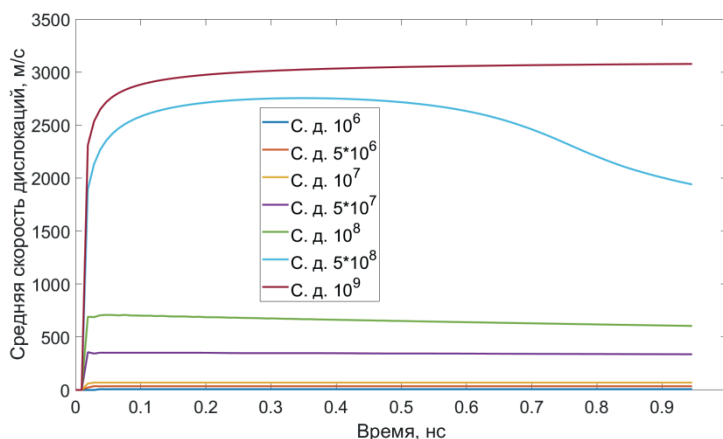


Рисунок 4. Зависимость сдвигового напряжения (сверху) и средней скорости дислокаций (снизу) от времени для различных скоростей деформаций при плотности дислокаций  $10^{15} \text{ м}^{-2}$  с рождением и аннигиляцией дислокаций.

### Список литературы:

1. Krasnikov V.S., Mayer A.E., Pogorelko V.V. Prediction of the shear strength of aluminum with  $\theta$  phase inclusions based on precipitate statistics, dislocation and molecular dynamics. International Journal of Plasticity, 2020, 128, 102672.
2. George E. Mase Theory and Problems of Continuum Mechanics
3. Mayer A.E., Lekanov M.V., Grachyova, N.A., Fomin, E.V. Machine-learning-based model of elastic-plastic deformation of copper for application to shock wave problem. Metals 2022, 12, 402
4. Khishchenko K.V., Mayer A.E. High- and low-entropy layers in solid behind shock and ramp compression waves. International Journal of Mechanical Sciences 2021, 189, 105971.
5. Kittel, C., 2004. Introduction to Solid State Physics. Wiley, New York.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ НАДЕЖНОСТИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА**

*Брегеда А.И.<sup>1,2</sup>, Липатов А.Н.<sup>1</sup>*

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

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

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

**AUTOMATING CALCULATION OF THE RELIABILITY INDEXES  
FOR THE ENGINEERING SYSTEMS  
BASED ON RELIABILITY BLOCK DIAGRAM  
WITH USE OF THE UNIVERSAL ALGORITHM**

*Bregeda A.I.<sup>1,2</sup>, Lipatov A.N.<sup>1</sup>*

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

*<sup>2</sup>FSAEI HE «Snezhinsk Physical and Technical Institute of National Nuclear  
Research University MIFI», Snezhinsk, Chelyabinsk region*

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

Приведено формальное определение основных компонентов структурной схемы надежности (ССН) технической системы, необходимых для получения исходных данных для автоматического расчета показателей надежности (ПН). Предложена система классов и расчетный модуль, реализующий алгоритм расчета ПН на основе ССН.

*Ключевые слова: структурно-сложные системы, показатели надежности, структурная схема надежности, алгоритмы и программы.*



Formal determination of the reliability block diagram's (RBD's) basic components for the engineering system is given for getting initial data to automatically calculate the reliability indexes (RI). Both the system of classes and the calculation module are proposed to realize the RBD-based RI calculation algorithm.

*Key words: structurally complex systems, reliability indexes, reliability flowchart, algorithms and codes.*

Рассмотрим некоторую техническую систему однократного действия с точки зрения её показателей надёжности. Допустим, что система состоит из  $n$  статистически независимых элементов (подсистем). Предположим также, что система и ее элементы могут находиться в одном из двух состояний: работоспособном и неработоспособном. Известно значение вероятности безотказной работы (ВБР) каждого элемента. Требуется найти ВБР системы, учитывая взаимосвязи её элементов (физические и функциональные).

Существуют различные методы расчёта ВБР системы в данной постановке. Остановимся на методах, основанных на *структурной схеме надёжности*. Наша задача состоит в том, чтобы из графического представления ССН (рис.1), созданного на компьютере, автоматически получать формулы для расчёта ВБР системы.

Для этого необходимо:

- 1) Определить основные компоненты и логические структуры, из которых состоит/должна состоять ССН.
- 2) Разработать систему классов предметной области, включающую, в том числе, описание ССН.
- 3) Разработать расчетный модуль для реализации универсального алгоритма расчета ПН на основе данной системы классов.

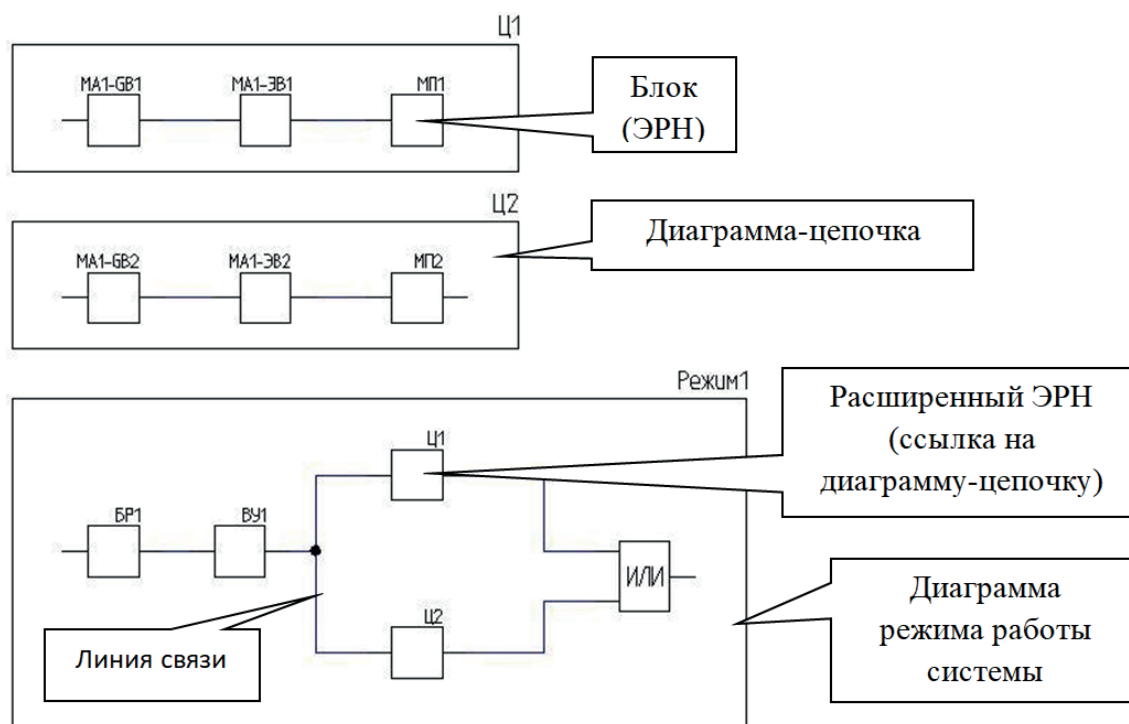


Рис.1. Структурная схема надежности

Согласно ГОСТ [1], ССН – это «логическое, графическое представление системы, показывающее, как состояния успеха ее подсистем и их комбинации влияют на состояние успеха системы». ССН состоит из соединённых между собой *блоков* или, что то же самое, *элементов расчета надежности* (ЭРН, согласно ОСТ). Каждый блок (ЭРН) соответствует прибору или его составной части, отказы которых влияют на надежность изделия.

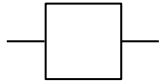
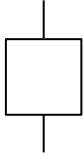
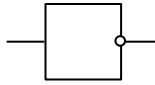
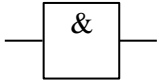
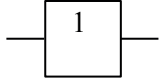

В ГОСТ определены основные графические элементы, из которых может состоять ССН:

- Элементарный блок (ЭРН) с одним входом и одним выходом,
- Последовательное соединение,
- Параллельное соединение,
- Составной блок (расширенный ЭРН),
- Вентиль «НЕ»,
- Логика «m из n».

В отраслевом стандарте этот набор расширен за счёт дополнительных логических вентилях «ИЛИ» и «И». В таблице 1 приведены те из названных графических элементов, которые, на наш взгляд, достаточны для формирования

ССН при анализе *статических* моделей надёжности. К перечисленным элементам добавлен также встречающийся в практических задачах *реверсивный элемент*, у которого каждый вход является одновременно и выходом.

Табл. 1. Графическое представление логических структур ССН

Графическое представление	Значение
	Элементарный ЭРН с одним входом и одним выходом
	Реверсивый (мостовой) элемент
	Вентиль НЕ
	Вентиль И
	Вентиль ИЛИ
	Составной ЭРН с одним входом и одним выходом: группировка элементарных ЭРН.

В моделях надёжности, основанных на ССН, используют логические связи между состоянием успеха (работоспособным состоянием) системы и состоянием успеха (работоспособным состоянием) ее компонентов (блоков ССН). *Путь успеха* определяется как набор блоков, который обеспечивает состояние успеха системы при том условии, что каждый блок в наборе находится в работоспособном состоянии. *Минимальный путь успеха* определяется как такой набор блоков, при котором отказ одного (любого) из блоков набора приводит к отказу всей системы.

Существуют алгоритмы [2] и программы [3], позволяющие на основе набора минимальных путей успеха, записанных в формальном математическом виде, автоматически получать формулы для расчёта ВБР системы.

Под формальным математическим видом здесь понимается представление ССН в виде математического графа, в котором ребра – это блоки, а узлы – взаимосвязи блоков. В таком графе, используя известные алгоритмы поиска, можно найти интересующий нас набор минимальных путей, соединяющих вершины «Вход» и «Выход» системы.

Каким образом из представления ССН, созданного в схемном редакторе и хранящегося в графическом файле, извлечь информацию, необходимую для создания математического графа ССН? Если ССН создана в среде стандартного схемного редактора, предназначенного для разработки электрических принципиальных схем, то это не трудная задача. Дело в том, что набор объектов, которыми оперирует такой редактор, очень близок по составу и связям к объектам, составляющим граф (рис. 2).

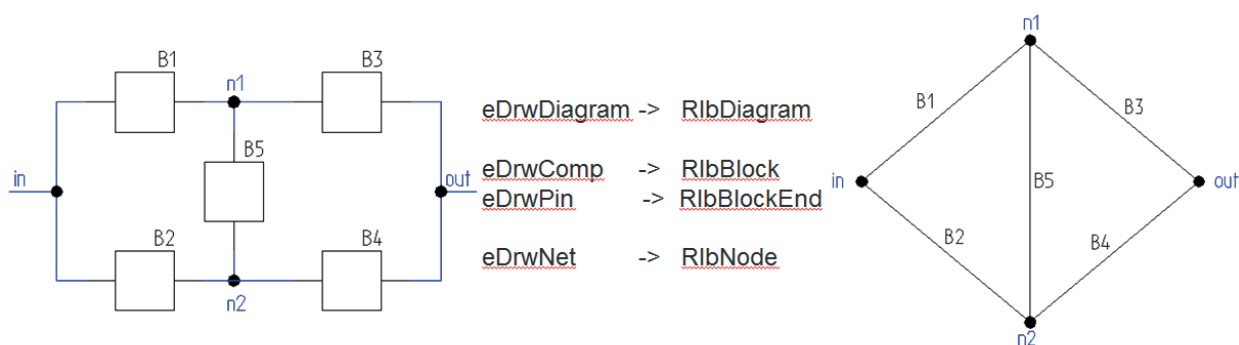


Рис. 2. Графическая ССН и её математический граф

Любой из подобных схемных редакторов оперирует, по крайней мере, следующими сущностями (в рамках `||...||` представлены объекты-аналоги на стороне графа):

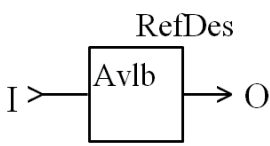
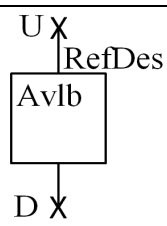
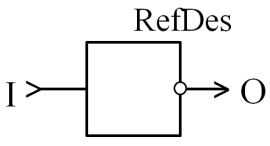
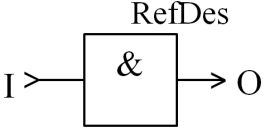
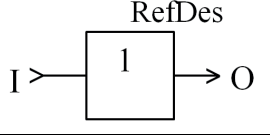
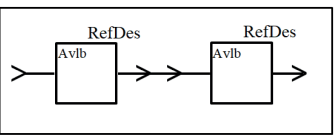
1) Схема (класс `DrwDiagram`) – контейнер, содержащий другие объекты, в частности, компоненты и цепи. || Граф ССН (класс `RlbDiagram`) – это контейнер, содержащий рёбра-блоки и связывающие их узлы. ||

2) Компонент (класс `DrwComp`) – компонент схемы, двухполюсник или многополюсник, содержащий концевые элементы (класс `DrwPin`), называемые «выводами» или «точками соединения». || Блок ССН (класс `RlbBlock`) – ребро графа ССН, концевые элементы которого (класс `RlbBlockEnd`) инцидентны узлам. ||

3) Цепь (класс DrwNet) – набор линий связи, соединяющих эквипотенциальные выходы компонентов. || Узел ССН (класс RlbNode) – узел графа ССН, в котором сходятся входные и выходные концевые элементы блоков. ||

Однако, прежде чем использовать подобный схемный редактор для получения ССН и последующего анализа ПН, необходимо на основе Таблицы 1 создать в среде этого редактора набор блоков-компонентов (типа DrwComp) с соответствующей структурой и атрибутами. Возможный вариант такого набора представлен в Таблице 2.

Табл. 2. Атрибутивное наполнение компонентов ССН

Графическое представление	Имя (расшифровка)	Набор атрибутов
	BUD (Block unidirectional)	RefDes="?" –позиционное обозначение In = "I" – имя входного вывода Out = "O" – имя выходного вывода Avlb = "?" - вероятность безотказной работы
	BBD (Block bidirectional)	RefDes="?" –позиционное обозначение Up = "U" – имя входного вывода Down = "D" – имя выходного вывода Avlb = "?" - вероятность безотказной работы
	BNOT (Block NOT)	RefDes="?" –позиционное обозначение In = "I" – имя входного вывода Out = "O" – имя выходного вывода
	BAND (Block AND)	RefDes="?" –позиционное обозначение In = "I" – имя входного вывода Out = "O" – имя выходного вывода
	BOR (Block OR)	RefDes="?" –позиционное обозначение In = "I" – имя входного вывода Out = "O" – имя выходного вывода
	DC (Diagram – Chain)	RefDes="?" –позиционное обозначение

Таким образом, в качестве первого шага мы определили основные компоненты и логические структуры, из которых должна состоять ССН, создаваемая в среде схемного редактора и доступная для процедур автоматизированного анализа ПН.

Следующим шагом стала разработка (на языке программирования C#) системы классов предметной области, включающей как описание «графической ССН», так и получаемой на её основе «ССН в виде графа». В результате был получен компактный набор классов, показанный на рис.3.

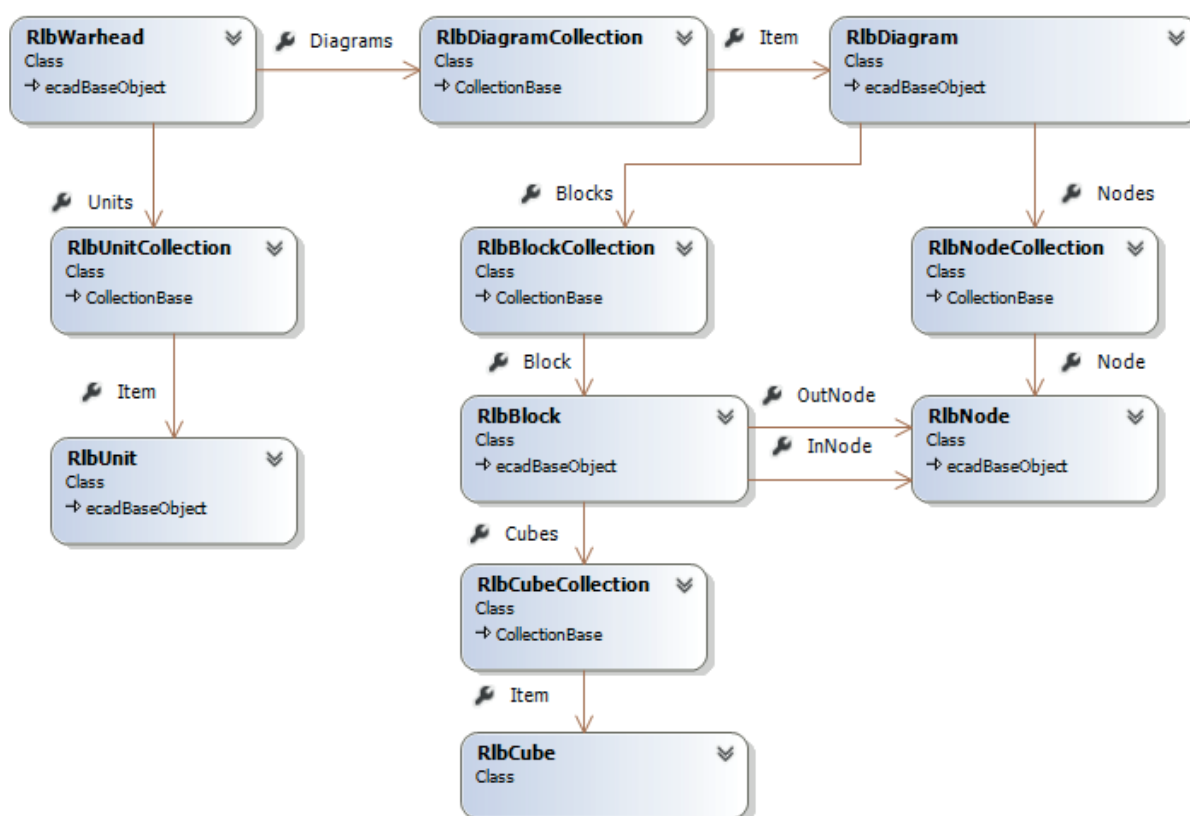


Рис. 3. Диаграмма классов предметной области

Проектируемое изделие, рассматриваемое в рамках анализа надежности как структурно-сложная система, описывается классом RlbWarhead. Изделие содержит в своем составе устройства (класс RlbUnit), обладающие собственными характеристиками надежности. Каждый режим работы изделия описывается определенной ССН, которая для целей анализа трансформируется в математический граф (класс RlbDiagram). Этот граф состоит из блоков (класс RlbBlock) строго определённого типа, соединённых узлами (класс RlbNode). Как правило, блок соответствует устройству, но может быть и «укрупненным»,

в этом случае он рекурсивно ссылается на некоторую диаграмму RlbDiagram. Для каждого блока определен набор кубов (класс RlbCube), который покрывает событие успеха, заключающееся в прохождении условного сигнала через блок.

Куб (RlbCube) – это вектор, характеризующий множество состояний системы с позиций теории вероятности. Его размерность равна количеству элементов в рассматриваемой системе, а каждая координата отвечает за состояние конкретного элемента (1- «работоспособен», 0 - «неработоспособен», \* - «безразличен»). На классе RlbCube определена «особая» операция Sharp, позволяющая путём многократного применения к *минимальным путям успеха* получить итоговое *несовместное покрытие события успеха* набором кубов. На основе этого покрытия автоматически получается формула полной вероятности для расчёта ВБР системы.

Детальный доклад о реализации универсального алгоритма расчета «прямой Sharp» на основе кубов был представлен ранее [3].

### **Список литературы:**

1. ГОСТ Р МЭК 61078-2021. Надежность в технике. Структурная схема надежности: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2022-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – М.: Стандартинформ, 2023 г. – 94 с.
2. Xu W., Shi D., Chen H. General algorithms for calculating system reliability. // Microelectronics and reliability. – 1987. – Vol. 27, №3. – P. 413-418.
3. Липатов А.Н., Брегеда А.И. Реализация универсального алгоритма для расчета надежности структурно-сложных систем на языке программирования C#. // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2024 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 31 января – 2 февраля 2024 г. - М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2024. – С. 185-186.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ

*Вазиева И.А.*

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

*vazieva.i@yandex.ru*

## REPRESENTATION OF SOLUTIONS TO THE NONLINEAR HEAT CONDUCTIVITY EQUATION BY TRIGONOMETRIC SERIES

*Vazieva I.A.*

*Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear  
University MEPHI, Snezhinsk, Chelyabinsk region*

*vazieva.i@yandex.ru*

*Ключевые слова: нелинейное уравнение теплопроводности;  
тригонометрические ряды.*

*Key words: nonlinear heat conductivity equation; trigonometric series.*

Предложенная в работе [1] методика решений нелинейных уравнений с частными производными применена к нелинейному уравнению теплопроводности в одномерном плоскосимметричном случае

$$u_t = uu_{xx} + \frac{1}{\sigma} u_x^2, \quad (1)$$

где  $\sigma$  есть положительная константа. То есть решение уравнения (1) представляется в виде тригонометрического ряда по косинусам

$$u(t, x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} u_k(t) \cos(kx). \quad (2)$$

Для уравнения на отрезке  $[0, \pi]$  ставятся непрерывные начальные условия, которые чётным образом продолжаются на отрезок  $[-\pi, 0]$  и поэтому можно воспользоваться рядом (2). Заметим, что решение уравнения (1) в виде тригонометрических рядов по синусам невозможно в силу конкретного вида



нелинейности исходного уравнения. Для коэффициентов ряда (2) получена бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме. С помощью тождественных преобразований от бесконечных двойных сумм сделан переход к одинарным бесконечным суммам.

Доказана локальная сходимость ряда (2) по времени. Построены конечные отрезки тригонометрических сумм, приближенно передающие решения соответствующих задач Коши для уравнения (1). В метрике  $L_2$  оценено отличие конечных сумм при разном числе слагаемых.

### **Список литературы:**

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргера тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, том 11, № 4, с. 5–318.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ ИНЖЕНЕРНОМ ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ЯРУС-И

*Валиуллин Илья Римович<sup>1,2</sup>, Милицина Татьяна Сергеевна<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский  
Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина»,  
Челябинская обл., г. Снежинск*

*<sup>2</sup>Снежинский физико-технический институт - филиал федерального  
государственного автономного образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», Челябинская обл., г. Снежинск*

[valiullin.ilyaa@yandex.ru](mailto:valiullin.ilyaa@yandex.ru), [mili\\_tanya@mail.ru](mailto:mili_tanya@mail.ru)

## NUMERICAL SIMULATION OF GAS DYNAMICS PROBLEMS IN THE DOMESTIC ENGINEERING SOFTWARE COMPLEX YARUS-I

*Valiullin Ilya Rimovich<sup>1,2</sup>, Militsina Tatyana Sergeevna<sup>1</sup>*

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

*<sup>2</sup>Research engineer at the Regional Competency Center for Supercomputer  
Modeling of the Russian Federal Nuclear Center of the All-Russian Scientific  
Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin,  
Russia, Snezhinsk*

### **Аннотация.**

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования задач Дэвиса, обтекания цилиндра и истечение струи в инженерном программном комплексе (ИПК) Ярус-И. Данный ИПК реализован на основе схемы КАБАРЕ с упрощенными диссипативными процессами. В результате решения задач получена визуализация полей параметров.

### **Abstract.**

This paper presents the results of numerical modeling of Davis problems, flow around a cylinder and jet outflow in the engineering software package (IPC) Yarus-I. This IPC is implemented based on the CABARET scheme with simplified dissipative

processes. As a result of solving the problems, visualization of the parameter fields was obtained.

**Ключевые слова:** численное моделирование; инженерный программный комплекс; схема КАБАРЕ.

**Keywords:** numerical modeling; engineering software package; CABARET scheme.

Водородная энергетика рассматривается как один из основных источников чистой безуглеродной энергии для промышленности и транспорта. В среднесрочной перспективе водород также может использоваться в качестве дополнения к традиционным ископаемым топливам, что поможет снизить углеродный след при их эксплуатации. Однако водород легко воспламеняется и способен формировать взрывные волны, поэтому обеспечение безопасности объектов водородной энергетики становится ключевой задачей при разработке соответствующих технологий, включая процессы получения, хранения, транспортировки и использования этого топлива.

Вычислительная гидрогазодинамика — безусловно, важнейший элемент будущей водородной энергетике. Но, существующие отечественные пакеты программ, не смогут полностью заменить классические эмпирические и полуэмпирические подходы из-за необходимости высокой дискретизации пространства для описания физических процессов. Так же эти программы уступают в скорости кодам, в которые внедрены полуэмпирические и феноменологические модели.

Для описания физических процессов при крупномасштабных авариях на объектах водородной энергетике в настоящее время ведется разработка ИПК Ярус-И. Данный программный комплекс — универсальный гидрогазодинамический код, основанный на уравнениях динамики многокомпонентного идеального газа с учетом упрощенных диссипативных процессов. ИПК не учитывает решения уравнений для термодиффузии и бародиффузии, так как при горении в больших масштабах диффузия осуществляется в основном за счет турбулизации. В дальнейшем Ярус-И будет дополняться эмпирическими, полуэмпирическими и феноменологическими моделями, описывающие физические процессы.

Для отработки методики и проверки корректности расчетов необходимо протестировать ИПК на модельных задачах гидрогазодинамики. Для этого были выбраны задачи Дэвиса [2, с. 269–289], обтекания цилиндра и истечение струи. Численное моделирование задач проводилось в ИПК Ярус-И на основе схемы КАБАРЕ [1, с. 467]. Данная схема обладает вторым порядком аппроксимации по времени и пространству и свойством консервативности.

Задача Дэвиса решалась в двумерной постановке для сжимаемого однокомпонентного газа без учета турбулентности. Дискретизация пространства осуществлялась равномерной расчетной сеткой  $50 \times 50$  ячеек. Получена

визуализация профиля температуры и поля скорости в момент времени  $t = 6 \text{ c}$  (рис.1).

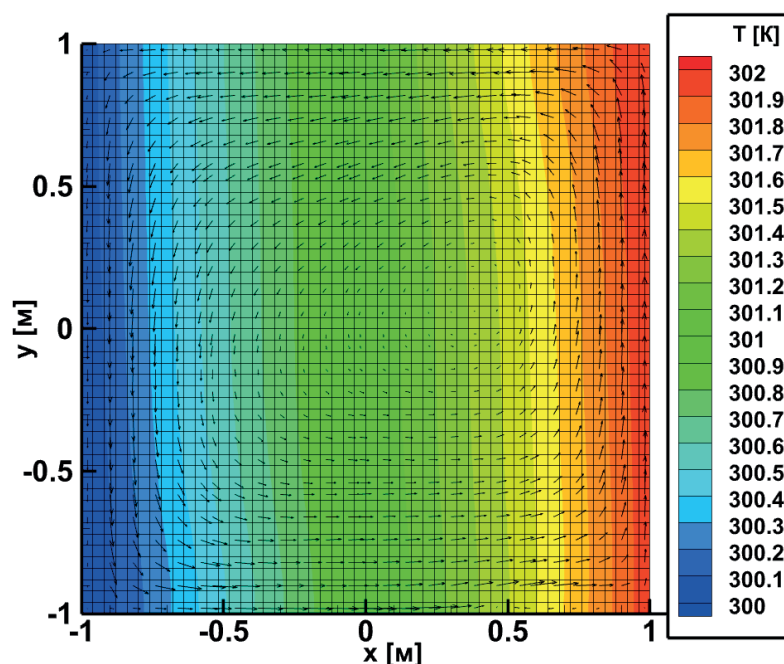


Рис.1. Профиль температуры и поле скорости в момент времени  $t = 6 \text{ c}$

Задача обтекания цилиндра решалась в двумерной постановке для сжимаемого однокомпонентного газа без учета турбулентности. Для моделирования эффекта дорожки Кармана использовалась сетка, которая сгущалась к поверхности цилиндра. Общее количество ячеек составляет 15 тысяч. Получена визуализация профиля ротора скорости в момент времени  $t = 10 \text{ c}$  (рис.2).

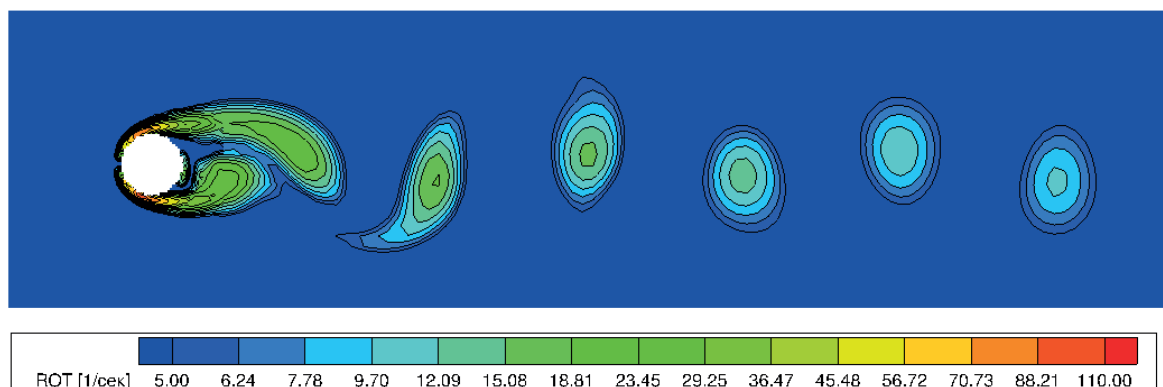


Рис.2. Профиль ротора скорости в момент времени  $t = 10 \text{ c}$

Численное моделирование истечения струи проводилось в рамках трехмерных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием модели турбулентности  $k - \epsilon$  [3, с. 269–289] для сжимаемого однокомпонентного газа. Расчеты проводились на равномерной сетке  $100 \times 50 \times 50$  ячеек. Получена визуализация профиля модуля скорости в момент времени  $t = 10 \text{ c}$  (рис.3).

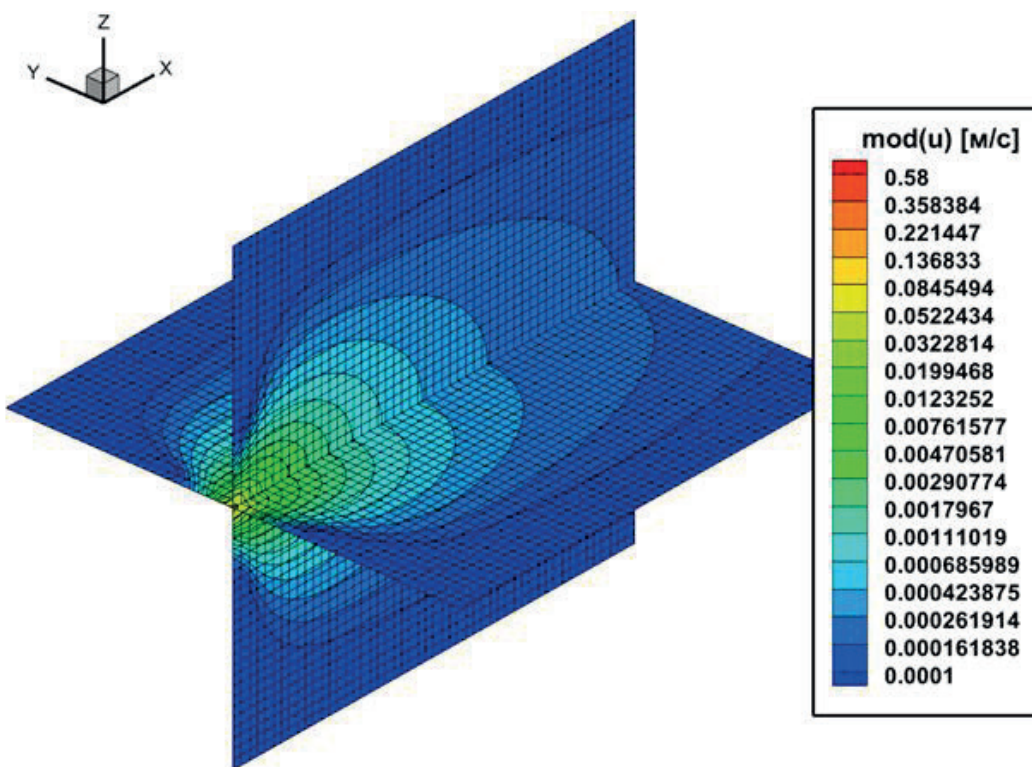


Рис.3. Профиль модуля скорости в момент времени  $t = 10$  с

### Список литературы:

1. Головизнин В. М., Зайцев М. А., Карабасов С. А., Короткин И. А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных систем // Издательство Московского университета Москва, 2013. 467 с.
2. Davis D.V.G. Natural convection of air in a square cavity: A bench mark numerical solution. // Int. J. Numer. Meth. Fl. – 1983. – Vol. 3, No. 3. P. 249-264.
3. Launder, B.E.; Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – Vol. 3, No. 2. P. 269–289.

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
РАДИАЦИОННОЙ РЕАКЦИИ СБИС НА ВОЗДЕЙСТВИЕ  
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ АМПЛИТУДНО-  
ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК**

*Грядобитов В.С.*

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл., ФГУП  
«РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», Снежинск, Челябинская обл.*

*[malum68@yandex.ru](mailto:malum68@yandex.ru)*

**DEVELOPMENT OF MODELS FOR PREDICTING THE RADIATION  
RESPONSE OF VLSI TO THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION OF  
VARIOUS AMPLITUDE-TIME AND SPECTRAL-ENERGY  
CHARACTERISTICS**

*Gryadobitov V.S.*

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear  
University MEPHI", Chelyabinsk region, Federal State Unitary Enterprise "RFNC-  
VNIITF named after. academic E.I. Zababakhina", Snezhinsk, Chelyabinsk region.*

*[malum68@yandex.ru](mailto:malum68@yandex.ru)*

**Аннотация**

Приведен метод выявления доминирующих механизмов сбоев интегральных микросхем при воздействии ионизирующих излучений. Предложены схемотехнические модели радиационной реакции СБИС на импульс тормозного излучения, генерации поверхностных состояний, тиристорного эффекта от нейтронного воздействия.

**Ключевые слова**

СБИС, тормозное излучение, поверхностные состояния, тиристорный эффект, схемотехническое моделирование.



## **Annotation**

A method for identifying the dominant failure mechanisms of integrated circuits when exposed to ionizing radiation is presented. Circuit models of the VLSI radiation response to a bremsstrahlung pulse, the generation of surface states, and the thyristor effect from neutron exposure are proposed.

## **Keywords**

VLSI, x-ray, surface states, latch-up effect, SEL, circuit modeling.

## **1 Введение**

Накопленный к настоящему времени объем моделей ставит на повестку дня вопрос о полномасштабном моделировании процесса воздействия полей ионизирующих излучений на всех уровнях иерархии разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и решения на основе такого моделирования практической задачи определения стойкости, что выражается в возможности прогнозирования поведения объекта при произвольной амплитудно-временной форме радиационного нагружения.

Известные к настоящему времени в литературе физико-топологические и схемотехнические модели не позволяют решить эту задачу, что связано с огромными темпами развития микроэлектроники, тенденциями которого являются снижение энергопотребления, увеличение быстродействия и повышение функциональной сложности изделий.

Задача полномасштабного моделирования воздействия ИИ на изделия СБИС тесно связана с задачей определения доминирующих механизмов сбоев микросхем при различных видах деструктивного воздействия. Как правило, типовые методики контроля не позволяют определить механизм сбоя в СБИС. Кроме того, полностью нерешённой является задача определения механизмов сбоев микросхемы при совместном воздействии различных видов ИИ.

Таким образом, **актуальность и новизна** работы обусловлены с одной стороны значительными темпами развития микроэлектроники, а с другой стороны отсутствием универсальных моделей, позволяющих прогнозировать радиационную реакцию изделий СБИС на воздействие ИИ различного типа и амплитудно-временной формы. **Практическая значимость** работы обусловлена тем, что для повышения достоверности определения радиационной стойкости приборов и систем, созданных на базе современных СБИС, необходимо решение следующих задач:

1. Определение механизмов сбоев СБИС при воздействии ионизирующих излучений.
2. Моделирование не отдельных компонент, а в целом испытываемых объектов на различных уровнях системной иерархии.

**Цель работы:** разработка моделей, позволяющих прогнозировать радиационную реакцию СОЗУ при вариации амплитудно-временных и спектрально-энергетических характеристик различных видов ионизирующих излучений.

## 2 Задача определения доминирующих механизмов сбоев СБИС

Одним из путей решения проблемы определения доминирующих механизмов сбоев может являться метод анализа карт сбоев – пространственного распределения ошибок, возникающих после воздействия ИИ, в картах памяти СОЗУ (рис. 1). Карты сбоев хранят информацию о виде деструктивного воздействия на микросхему и могут быть использованы для определения доминирующих механизмов сбоев [1].

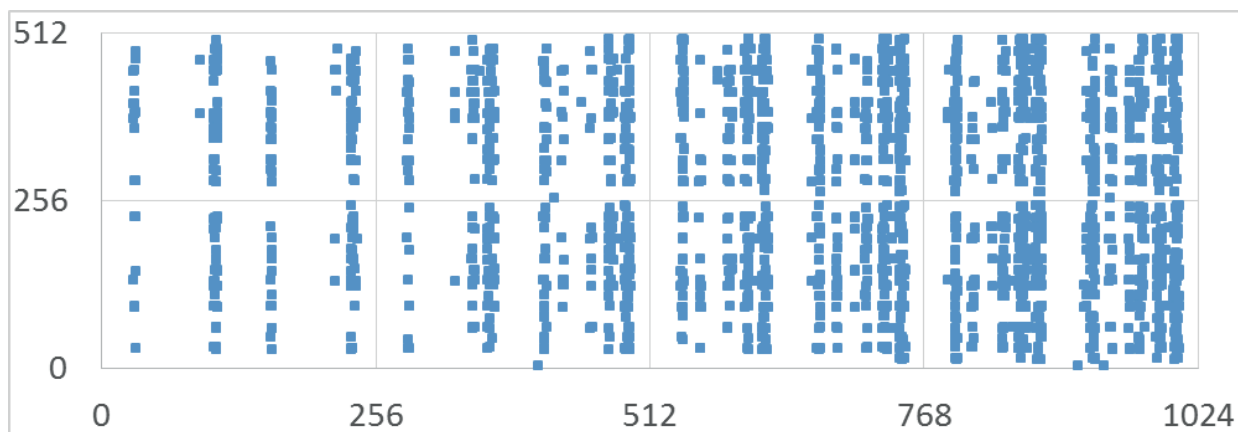




Рис. 1. Пример карты сбоя элемента СОЗУ

Суть метода карт сбоя заключается в обработке массива данных о пространственном распределении сбоя с помощью методов цифрового анализа и последующем выявлении особенностей, характерных для различных радиационных эффектов.

При этом метод карт сбоя является новым, в настоящее время анализ пространственного распределения ошибок в СОЗУ лишь частично встречается в отдельных научных работах [2, 3]. Таким образом, актуальна задача по развитию данного метода с целью выявления доминирующих радиационных эффектов при различных видах воздействия на микросхему.

### 3 Моделирование радиационной реакции СОЗУ на воздействие импульсного тормозного излучения

В самом общем случае, для оценки распределения потенциалов в СОЗУ при воздействии импульса ИИ, микросхему можно представить, как показано на рис. 2. Аналогичной схемой можно представить любую СБИС [4].

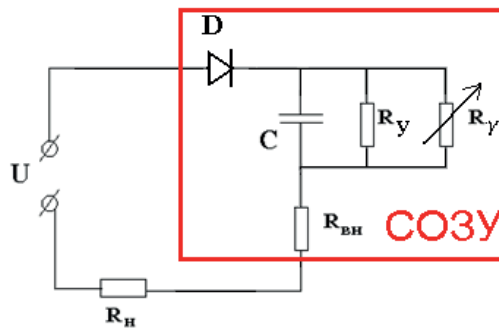


Рис. 2. Эквивалентная схема радиационной реакции СОЗУ

$C$  – емкость микросхемы относительно потенциального и общего электродов;  $R_y$  – сопротивление, учитывающее токи потребления микросхемы в нормальном режиме работы;  $R_{vn}$  – распределенное сопротивление, обусловленное токопроводящими дорожками;  $R_y$  – радиационно-наведённая проводимость

Функциональный сбой микросхемы имеет место при просадке напряжения ниже  $U_{кр}$  (минимальное напряжение питания при котором микросхема сохраняет функциональную работоспособность).

Таким образом, зная напряжение питания и некоторые характеристики микросхемы, при помощи радиационного коэффициента  $K_{\gamma}$  (порядковые значения для разных СБИС приведены в [4]), можно оценить уровень бессбойной работы ИМС.

$$P_{\text{расч}} \geq \frac{1}{K_{\gamma} \cdot R_{\text{ВН}} \cdot C} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{кр}}}{U_{\text{пит}}}\right).$$

Выполненные расчётные оценки УБР для микросхем СОЗУ, изготовленных по технологиям КНИ и объёмного кремния, а также для МК АТmega128 показали удовлетворительное согласие с УБР, полученным для этих микросхем в эксперименте.

#### **4 Моделирование генерации поверхностных состояний в микросхеме при воздействии импульса ИИ**

В самом общем случае процесс накопления поверхностных состояний в микросхеме может быть описан уравнением кинетики [5]:

$$\frac{dn}{dt} = K \cdot P(t) - \frac{n}{\tau}.$$

Здесь  $n$  – концентрация поверхностных состояний,  $P(t)$  – форма импульса,  $\tau$  – характерное время релаксационных процессов, обусловленных воздействием ИИ.  $K$  – коэффициент пропорциональности.

При численном решении уравнения кинетики для оценки значений концентрации поверхностных состояний будем считать, что коэффициент пропорциональности  $K = 1$ , и измерять концентрацию в условных безразмерных единицах. Эксперименты показали, что время релаксации  $\tau$  существенно зависит от температуры образца [6], что позволяет учитывать температурный фактор при решении уравнения кинетики.

Форму импульса на ускорителе электронов, ядерном реакторе и изотопном источнике приближенно можно описать нормальным законом распределения

$$P(t) = P_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{t - t_{\text{имп}}}{2\sigma^2}\right),$$

На рисунке 3 показана зависимость концентрации поверхностных состояний в СОЗУ от времени при воздействии импульсов тормозного излучения

ускорителя электронов (синяя кривая) и ядерного реактора (красная кривая).  
Время релаксации  $\tau = 10$  мс [6].



Рис. 3. Зависимость концентрации поверхностных состояний от времени (расчёт) при облучении на ускорителе электронов 1 (синяя кривая,  $n_1$ ) и ядерном реакторе (красная кривая,  $n_2$ );  $\tau = 10$  мс

Из рис. 3 видно, что максимальные значения для рассчитанных кривых приблизительно равны и составляют 100 условных единиц. Это значение можно считать равным критической концентрации поверхностных состояний для микросхем исследуемого типа, при которой наблюдаются сбои. Таким образом, выполняя расчёт для различной амплитудо-временной формы воздействия, можно прогнозировать примерный УБР микросхемы.

Используя различные значения  $\tau$  для численного решения уравнений, можно путём подстановки выполнить оценку УБР микросхемы (мощность экспозиционной дозы) для различной температуры. Подобная зависимость для изотопного источника ИИ постоянной мощности представлена на рис. 4.

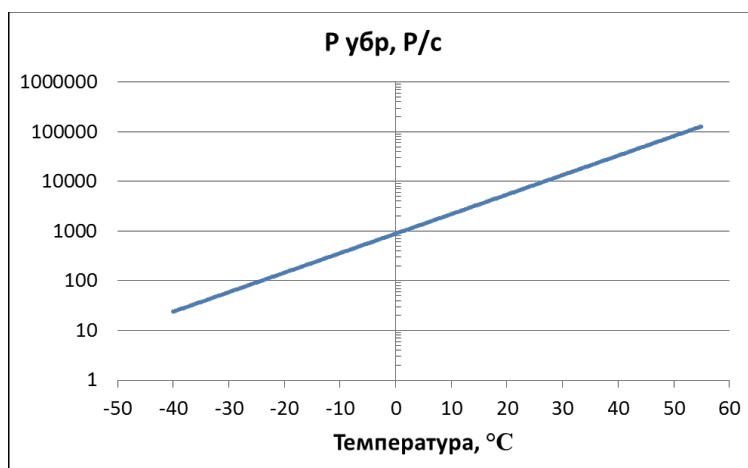


Рис. 4. Расчётная зависимость УБР от температуры

## 5 Моделирование тиристорного эффекта в СОЗУ при нейтронном воздействии

В литературе достаточно мало представлены результаты исследований ТЭ, вызванного воздействием нейтронов. В работе [7] исследовано влияние температуры и напряжения питания на частоту возникновения ТЭ в СОЗУ при воздействии атмосферных нейтронов и показано, что сечение ТЭ ( $\sigma_{ТЭ} = f(U, T)$ ) зависит от напряжения питания и температуры. В работе [8] образцы подвергали воздействию нейтронов с энергией 2,5 МэВ и 14 МэВ, а также нейтронов спектра деления. При облучении статических ОЗУ нейтронами с энергией 14 МэВ в исследуемых образцах наблюдали одиночные сбои (ОС) и ТЭ.

Таким образом, определение условий возникновения ТЭ в микросхеме и исследование зависимости  $\sigma_{ТЭ} = f(U, T)$  при воздействии нейтронов с энергией 14 МэВ являются актуальными и практически значимыми задачами.

На рис. 5 представлена характерная осциллограмма тока потребления микросхемы при возникновении ТЭ в экспериментах.

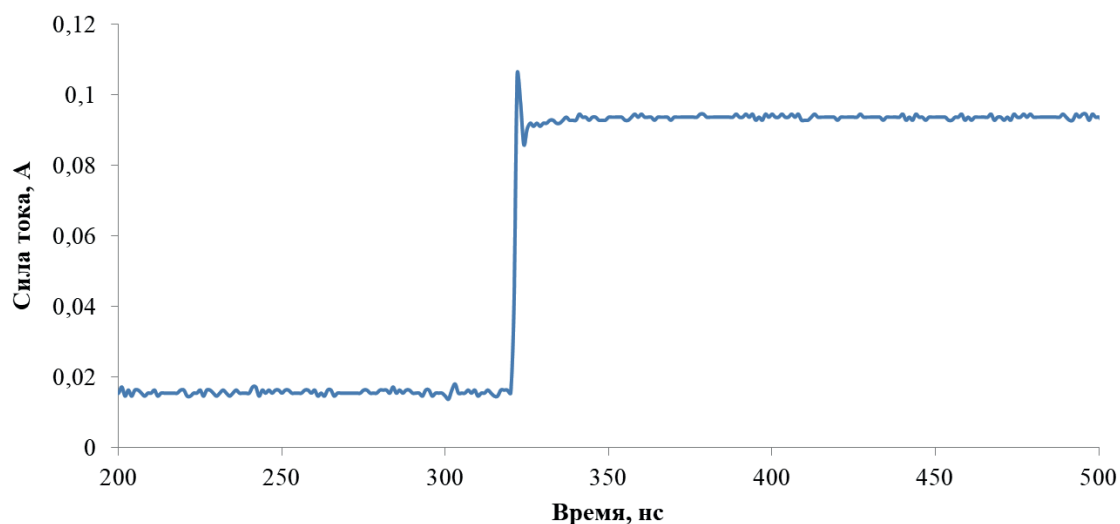


Рис. 5. Характерная осциллограмма тока потребления СОЗУ при возникновении ТЭ

Схемотехническое сечение паразитной тиристорной p-p-n-p структуры в инверторе, выполненном по объёмной КМОП технологии, показано на рис. 6.

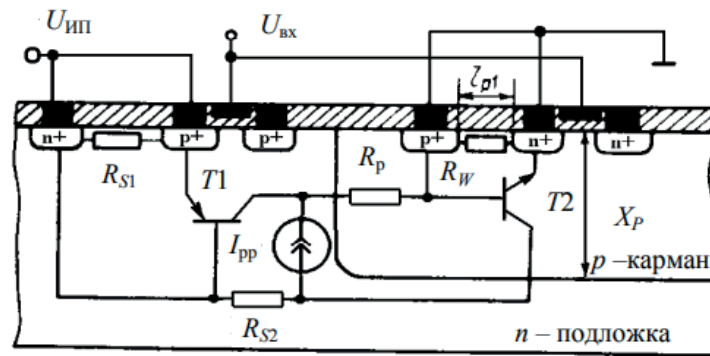


Рис. 6. Схема, иллюстрирующая наличие паразитных биполярных транзисторов в n-p-n-p структуре КМОП инвертора с n-карманом [9]

Анализ различных схемотехнических моделей тиристорных элементов показывает, что все доминирующие эффекты в них достаточно хорошо описываются двухтранзисторной эквивалентной схемой, представленной на рис. 7. В качестве «частицы», вызывающей активацию защёлкивания, выступает импульсный источник тока, подключенный к базе одного из транзисторов биполярной структуры.

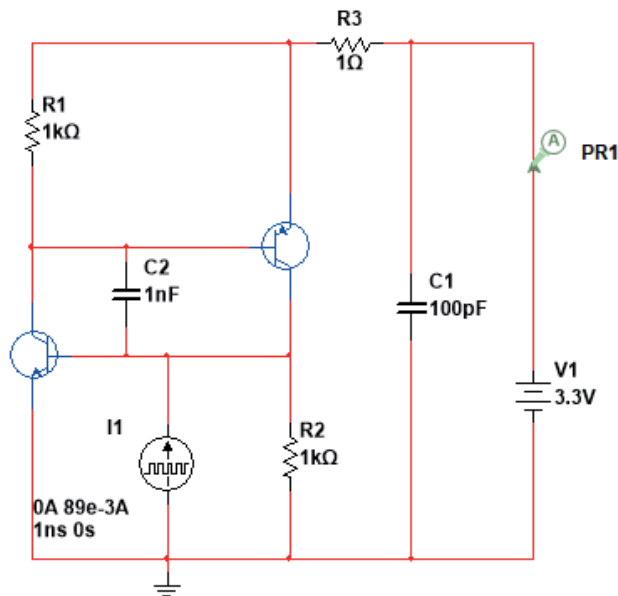


Рис. 7. Схемотехническая модель тиристорного эффекта в САПР

Расчет первичного ионизационного тока коллекторного перехода планируется провести на физико-топологическом уровне. На данном же этапе

для ионизационного тока, вызванного воздействием нейтронного излучения, была выбрана колоколообразная форма импульса с полушириной в 1 нс.

На рисунке 8 изображена осциллограмма тока в цепи питания схемы при срабатывании импульсного источника тока.

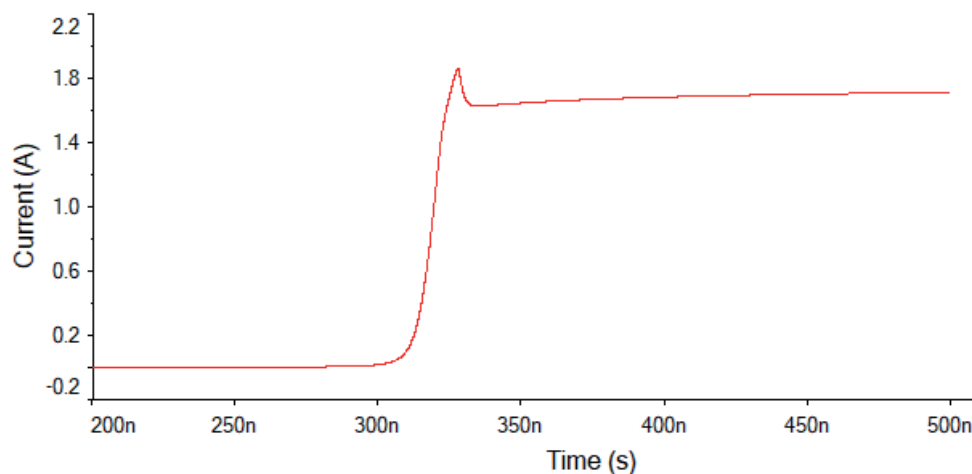


Рис. 8. Результат схемотехнического моделирования развития тиристорного эффекта

Видно, что по форме нарастания ток соответствует форме тока, полученной в экспериментах (см. рис. 5). Однако для полного соответствия по временным и амплитудным параметрам необходимо уточнение параметров схемотехнической модели с помощью физико-топологического моделирования.

## 6 Заключение

В настоящей работе предложены модели:

- радиационной реакции СОЗУ на воздействие импульсного тормозного излучения;
- генерации поверхностных состояний в микросхеме при воздействии импульса ИИ;
- тиристорного эффекта в СОЗУ при нейтронном воздействии.

Результаты схемотехнического моделирования каждой модели показывают удовлетворительное согласие с экспериментальными данными, что позволяет применять их на практике для прогнозирования радиационной реакции СБИС на радиационное воздействие.

Дальнейший ход работы будет сосредоточен на разработке физико-топологических моделей воздействия ИИ на топологические элементы ИМС и использовании полученных при физико-топологическом моделировании результатов в схемотехнических моделях.

### **Список литературы:**

1. О.В. Ткачев, А.С. Кустов, А.С. Пилипенко, В.С. Грядобитов. Исследование особенностей в распределении сбоев в СОЗУ при воздействии различных видов ионизирующего излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №3, 2020 г.
2. A. Bosser et al., "A Methodology for the Analysis of Memory Response to Radiation through Bitmap Superposition and Slicing," 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/RADECS.2015.7365578.
3. В. Чепов, И. Швецов-Шиловский, С. Шмаков. Алгоритм соотнесения физической и логической адресаций в микросхемах памяти с помощью источников лазерного излучения // Безопасность информационных технологий, 27(3), 43-53, 2020 г.
4. А.С. Кустов, В.С. Грядобитов. Метод оценки уровня бессбойной работы ИМС на основе электрических параметров микросхемы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. №3 – 2022, г. Лыткарино. С. 5-14. УДК 621.382:539.12.04
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 ч.: Перевод с англ. / Под ред. Р. А. Суриса. М., 1984.
6. О.В. Ткачев, А.С. Кустов, К.Д. Кокшарова, В.С. Грядобитов. Влияние длительности релаксации радиационных эффектов на уровень бессбойной работы СОЗУ // Вопросы атомной науки и техники. Серия:

Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру,  
№1, 2021 г.

7. Paul E. Dodd, Marty R. Shaneyfelt, James R. Schwank, and Gerald L. Hash, Neutron-induced latchup in SRAMs at ground level // IEEE 03CH37400. 41st Annual International Reliability Physics Symposium, Dallas, Texas, 2003.
8. A. Hands, P. Morris, C. Dyer, K. Ryden, and P. Truscott. Single Event Effects in Power MOSFETs and SRAMs Due to 3 MeV, 14 MeV and Fission Neutrons // IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 58, № 3, 2011, pp. 952-959.
9. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА**

*Данилов Н.Е.<sup>1,2</sup>, Гаврилов Д.С.<sup>1</sup>*

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

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

*[danilovnikolai333@mail.ru](mailto:danilovnikolai333@mail.ru)*

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

*Danilov N.E.<sup>1,2</sup>, Gavrilov D.S.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>FSUE «Russian federal nuclear center – All-Russian scientific research  
institute of technical physics named after academician E.I. Zababakhin», Snezhinsk,  
Chelyabinsk district*

*<sup>2</sup> Snezhinsk Physics and Technology Institute of National Research Nuclear  
University MEPHI, Snezhinsk, Chelyabinsk region*

*[danilovnikolai333@mail.ru](mailto:danilovnikolai333@mail.ru)*

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

решения этой проблемы, авторами предлагается спроектировать оптико-электронную систему на базе жидкокристаллической матрицы.

В данной работе приведены результаты исследования жидкокристаллической матрицы просветного типа, определены её основные оптические характеристики.

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

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

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

Основу центра лазерно-физических исследований (ЦЛФИ) РФЯЦ-ВНИИТФ составляет ряд импульсных лазерных установок, которые способны генерировать мощные (порядка тераватт) лазерные импульсы в пико- и фемтосекундном диапазонах. Такие импульсы используются в лазерно-плазменных экспериментах для исследований в области физики высоких плотностей энергии. Также, данные установки могут быть использованы для

генерации и ускорения заряженных частиц, генерации нейтронов и ультракоротких импульсов рентгеновского и гамма излучений.

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

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

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

В оригинальной работе [1] использовалась ЖКМ, изготовленная по LCoS технологии. Такие матрицы работают на отражение, и их ключевыми преимуществами (по сравнению с ЖКМ просветного типа) являются: малая дискретность формируемого изображения и большой коэффициент

использования полезной площади модуляции. Для осуществления амплитудной модуляции предлагается использовать ЖКМ в качестве динамического элемента пространственного фильтра [2]. Подразумевается, что такой модулятор будет оснащён контрольно-измерительной системой для обеспечения обратной связи по управлению.

Однако, использование ЖКМ данного типа сопряжено с рядом трудностей. Во-первых, доступные на рынке ЖК-техники предложения обладают малой рабочей апертурой ( $\sim 10 \times 10$  мм). Во-вторых, техническая документация на предлагаемые ЖКМ недостаточно информативна или полностью недоступна. В-третьих, покупка целого LCoS проектора для нужд исследования представляется нецелесообразной ( $\sim 1000000$  руб.).

Оптимальны в этом плане ЖКМ просветного типа. Поэтому, было решено приобрести целый проектор и для целей исследования извлечь ЖКМ вместе с платой управления. В итоге, была получена ЖКМ просветного типа «FPC-RX040H-1400-V0» с рабочей апертурой  $87 \times 52$  мм, размером пикселя  $108 \times 108$  мкм и контрастностью 1000:1.

Оптические характеристики данной ЖКМ исследовались на стенде ЦЛФИ для контроля качества оптических деталей (на длине волны 1064 нм). Оценка контрастности и коэффициента пропускания осуществлялась по изображениям на рисунке 1.

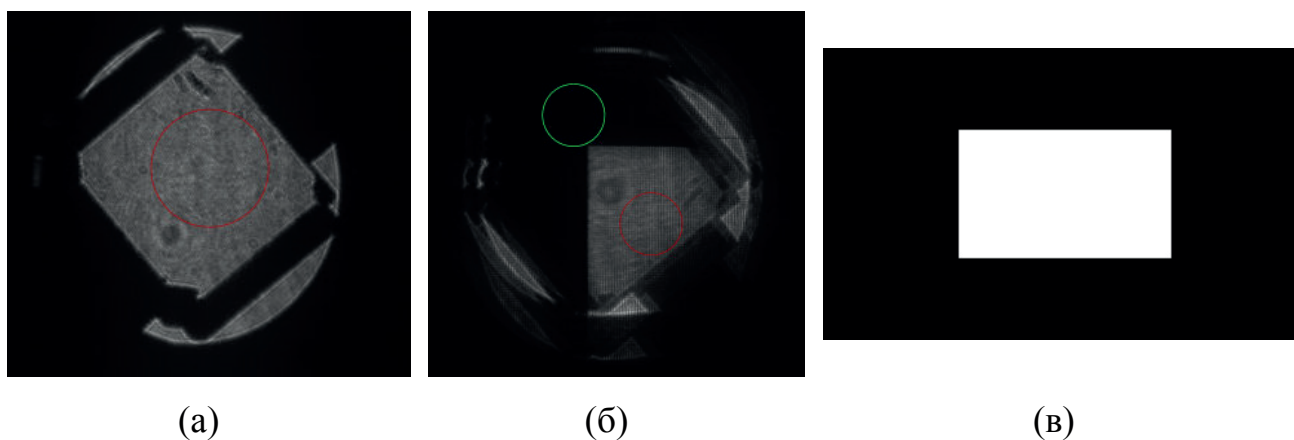


Рис.1. (а) ЖКМ выведена из пучка (экспозиция 10 мс), (б) ЖКМ в пучке (экспозиция 100 мс), (в) тест-изображение, формируемое на ЖКМ

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

Коэффициент пропускания ЖКМ рассчитывался по формуле 1:

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

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

Контраст ЖКМ определялся по формуле 2:

$$K = \frac{I_{avr}^B}{I_{avr}^D} \quad (2)$$

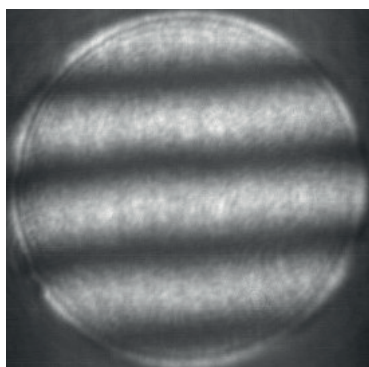
где,  $I_{avr}^B$  – средняя по выборке «яркость» светлого участка ЖКМ (рисунок 1 (б), красный круг),  $I_{avr}^D$  – средняя по выборке «яркость» тёмного участка ЖКМ (рисунок 1 (б), зелёный круг).

Получены следующие значения коэффициента пропускания и контраста ЖКМ:

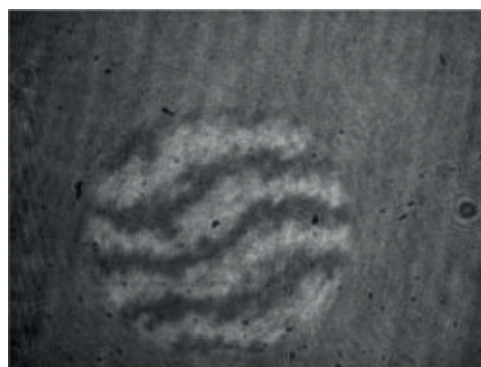
$$T = 8 \pm 1\%$$

$$K = 14 \pm 2 \text{ отн. ед.}$$

На интерферометре Маха-Цендера (в составе стенда) зарегистрированы следующие интерферограммы (рисунок 2).



(а)



(б)

Рис. 2. Результаты интерферометрии ЖКМ «FPC-RX040H-1400-V0»: (а) – опорная интерферограмма, (б) – интерферограмма исследуемой матрицы

Интерферограмма на рисунке 2 (б) соответствует искажению волнового фронта с  $RMS = 0,12 \pm 0,01 \lambda$ . Расшифровка интерферограмм производилась с помощью ПО собственной разработки [3].

Полученные результаты в некоторой мере ожидаемы. Так, экспериментальное значение контраста существенно отличается от заявленного. Следует понимать, это обусловлено рабочим спектральным диапазоном рассмотренной ЖКМ (с максимумом характеристик в видимой части спектра). Оптическое качество ЖКМ на приемлемом уровне.

### ***Список литературы:***

1. S.-W.Bahk, E. Fess, B. E. Kruschwitz, and J. D. Zuegel «A high-resolution, adaptive beam-shaping system for high-power lasers», OPTICS EXPRESS 18(9) 9151-9163 (2010).
2. Joseph P. Kirk, Alan L. Jones Phase-Only Complex-Valued Spatial Filter – Journal of Optical Society of America, vol. 61, №8, 1971.
3. Данилов Н.Е. Программное обеспечение для обработки интерферограмм - Наукосфера. №4 (2), 2021.

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУНКЦИЕЙ ПОТЕРЬ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ОДНОМЕРНОМ СЛУЧАЕ**

**Исупова А.А.<sup>1,2\*</sup>, Теплых Н.А.<sup>1,2</sup>**

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

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

*Челябинская обл.<sup>2</sup>*

*[\\*a.a.isupova@vniitf.ru](mailto:a.a.isupova@vniitf.ru)*

## **THE APPLICATION OF NEURAL NETWORK WITH MODIFIED LOSS FUNCTION TO SOLVE HEAT CONDUCTION EQUATION IN THE ONE-DIMENSIONAL CASE**

***Isupova A.A., Teplykh N.A.***

*<sup>1</sup>FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin», Snezhinsk,  
Chelyabinsk region*

*<sup>2</sup> Snezhinsk Physics and Technology Institute of National Research Nuclear  
University MEPHI, Snezhinsk, Chelyabinsk region*

В статье представлен обзор нейронных сетей, у которых дифференциальные уравнения (ДУ) закладываются в функцию потерь. В английской литературе такие сети получили название «Physics-Informed Neural Networks (далее PINN)» [1], что в переводе на русский язык означает «Нейронные сети, учитывающие физические законы». Для решения уравнения выбираются внутренние точки области, в которых решается поставленная задача оптимизации при помощи метода автоматического дифференцирования. Выбор этих точек крайне важен для получения удовлетворительного решения. Поэтому была предложена модификация PINNs, в которой в область решения включаются дополнительные точки, в



которых невязки в уравнении выше некоторого порогового значения (Residual-based adaptive refinement или RAR). Для тестирования предложенного метода было выбрано уравнение теплопроводности в одномерном случае.

*Ключевые слова:* нейронные сети, Physics-Informed Neural Networks, дифференциальные уравнения в частных производных, уравнение теплопроводности.

The paper presents an overview of neural networks with differential equations (DE) embedded in the loss function. In the English literature such networks are called "Physics-Informed Neural Networks (PINN)" [1]. In order to solve the equation, one should select the interior points of the domain, in which the set optimization problem is solved using the method of automatic differentiation. The selection of these points is crucial to obtain a satisfactory solution. Therefore, a modification of PINNs was proposed, in which additional points are included in the solution domain where the non-convexities in the equation are higher than some threshold value (Residual-based adaptive refinement or RAR). The heat conduction equation in the one-dimensional case was chosen to test the proposed method.

*Key words:* Neural Networks, Physics-Informed Neural Networks, Partial Differential Equations, Heat Equation

## **Введение**

Дифференциальные уравнения в частных производных – это математический инструмент для описания различных физических явлений, таких как теплоперенос в веществе, распространение звуковых волн, электромагнитных волн, течение жидкостей и т.п. Решение таких уравнений находит применение в естественных науках: астрофизике, химии, а также материаловедении, гидродинамике и др. Однако, несмотря на свое широкое



распространение, лишь в редких случаях можно получить аналитическое решение таких уравнений. Для преодоления этой проблемы были разработаны численные методы, имеющие строго обоснованную формулировку, высокую точность и устойчивость. К традиционным численным методам относят методы конечных разностей, элементов и объемов, однако их применение привносит в задачу определенную погрешность, связанную с дискретизацией рассматриваемой области.

В 2017 году американскими учеными Raissi et. al. [1] был предложен новый численный метод PINNs, основанный на глубоких нейронных сетях. К этому времени нейронные сети уже применяли для решения различных типов дифференциальных уравнений, где на вход сети подавали различные измерения, проведенные прибором, а на выходе хотели получить итоговое распределение конкретных величин. Данный метод сильно зависит от входных данных: даже незначительный шум может кардинально исказить желаемый результат, а также предсказательная способность модели ограничивается только тем набором данных, на котором она была обучена. Эти ограничения привели к созданию глубоких нейронных сетей, у которых в функцию потерь дополнительно включен член, содержащий дифференциальные уравнения. Оптимизируя функцию потерь, нейронная сеть после процесса обучения удовлетворяет требуемому уравнению, что позволяет получать решения даже в условиях зашумленных данных. PINNs и его модификации применялись для решения как прямых, так и обратных задач, например уравнения Навье-Стокса, стохастические уравнения, уравнения высокой размерности и т.д. Более того, данный метод использовался для моделирования поведения материала при механических нагрузках, в медицине его использовали для получения функции, описывающей сердечный ритм, в гидромеханике для моделирования течения турбулентной жидкости.

Несмотря на значительный успех, на данный момент не существует единой модели, способной решать любое дифференциальное уравнение. Архитектура PINNs может изменяться в зависимости от числа скрытых слоев, нейронов в каждом слое, функции активации, количества точек обучения, их начального распределения, скорости обучения, метода оптимизации и т.п.

### Структура PINNs

PINNs могут решать нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, записанные в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + L(u) = 0; (x, t) \in \Omega \times [0, T] \\ u(x, t) = g(x, t); (x, t) \in \partial\Omega \times [0, T] \\ u(x, 0) = h(x); x \in \Omega \end{cases} \quad (1)$$

где  $(x, t)$  – вектор пространственно-временных координат,  $u(x, t)$  – искомое решение,  $L$  – нелинейный дифференциальный оператор.

Для того, чтобы решить уравнение (1) при помощи PINNs, строится нейронная сеть  $\mathcal{N}(x, t, \theta)$ , где  $\theta$  – это веса нейросети,  $(x, t)$  – это входные параметры сети и  $\mathbf{u} = [u_1(x, t), \dots, u_n(x, t)]$  – это выходные параметры сети. Структура PINNs представлена на рисунке 1 [2].

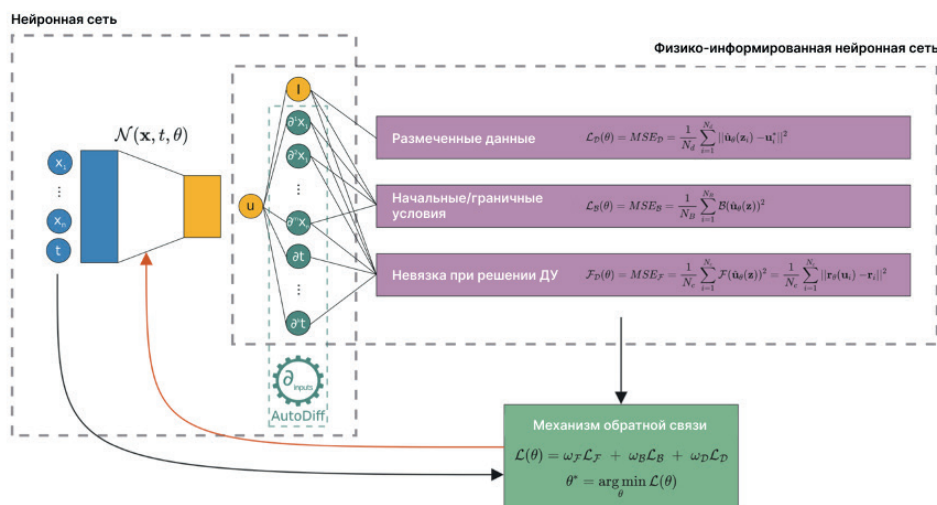


Рис. 1 – Структура PINNs [2]

Введем функцию потерь так, чтобы мы могли по отдельности учитывать влияние дифференциального уравнения  $L_f$ , граничных  $L_{BC}$  и начальных  $L_{IC}$  условий.

$$\theta = \left( L_f(\theta) + L_{BC}(\theta) + L_{IC}(\theta) \right) \quad (2)$$

Теперь подробнее рассмотрим уравнение. Поскольку правая часть равна нулю, то всякое отклонение уравнения от истины будет нарушать равенство, делая его ненулевым (т.е. появляется аналог невязки уравнения).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) = \xi \quad (3)$$

А значит, чтобы уравнение удовлетворялось, необходимо устремить невязку к нулю, для чего и нужна функция потерь.

$$L_F(\theta) = \frac{1}{N_f} \left\| \frac{\partial \mathfrak{u}}{\partial t}(x, t, \theta) + L(\mathfrak{u}(x, t, \theta)) \right\|_{\Omega \times [0, T]}^2 \quad (4)$$

$$L_B(\theta) = \frac{1}{N_{BC}} \left\| \mathfrak{u}(x, 0, \theta) - g(x) \right\|_{\Omega}^2 \quad (5)$$

$$L_{IC}(\theta) = \frac{1}{N_{IC}} \left\| \mathfrak{u}(x, 0, \theta) - h(x) \right\|_{\Omega}^2 \quad (6)$$

Здесь функция потерь имеет особый вид, называемый среднеквадратичной ошибкой (Mean Squared Error или просто MSE).

### **Метод адаптивного уточнения на основе невязок в уравнении**

Уравнения 5-6, отвечающие за граничные и начальные условия, относятся к типу машинного обучения с учителем, поскольку здесь есть размеченные данные (каждой паре  $(x, y)$  соответствует метка – точка  $u(x, t)$ ). Уравнение 4 не имеет таких меток и является мягким ограничителем для

нейронной сети. Недостаточное количество внутренних точек или их неразумное распределение в области может привести PINNs к неверному решению задачи. Так, в некоторых областях решение достаточно гладкое и нейронная сеть может с легкостью его получить, в то время как в других областях может находиться сильно нелинейное решение и в этой области нужно больше точек. Таким образом, если распределение внутренних точек не адаптируется к конкретной задаче, PINNs не может предоставить верное решение. В связи с этим необходим алгоритм, который способен самостоятельно в зависимости от задачи перераспределять внутренние точки области для получения лучшего решения. В статье [3] было предложен метод адаптивного уточнения на основе невязок в уравнении (Residual-based adaptive refinement или RAR), суть которого состоит в добавлении дополнительных точек в те места области, где невязки превышают заданное пороговое значение. Алгоритм метода RAR:

1. Задать выборку из начального количества внутренних точек  $\mathcal{L}$ ;
2. Обучить нейронную сеть заданное количество эпох.;
3. **Repeat** Повторять;
  - a. Выбрать новые точки в области  $S_0$ ;
  - b. Вычислить невязки для уравнения в этих точках;
  - c. Выбрать  $m$  точек ( $S \leftarrow m$ ) с наибольшими невязками в  $S_0$ ;
  - d. Объединить новые точки с начальной выборкой  $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \cup S$ ;
  - e. Запустить процесс обучения на заданное количество эпох;
4. **Until** Пока общее количество итераций или общее количество точек не достигнет предела

### Решение уравнения теплопроводности в одномерном случае

Постановка задачи следующая:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f = 0; x \in [-1,1], t \in [0,1];$$

$$f(x, t) = \exp(-t) * \sin(\pi x) - \pi^2 \sin(\pi x)$$

$$u(x, 0) = \sin(\pi x)$$

$$u(-1, t) = u(1, t) = 0$$

Зададим базовую архитектуру нейронной сети: сеть имеет 5 скрытых слоев. На каждый скрытый слой приходится по 20 нейронов. В качестве функции активации выбран гиперболический тангенс. Обучение производилось в течение 5000 эпох с помощью метода оптимизации Адам со скоростью обучения  $10^{-3}$ . Затем с помощью алгоритма LBFGS до сходимости  $10^{-5}$ . Для алгоритма RAR PINNs далее производится добавление внутренних точек области.

На рисунке 2 представлено сравнение PINNs и RAR PINNs. Как и было описано в теоретической части, модель очень точно описывает начальное условие, однако неспособна удовлетворять уравнению в последующие моменты времени.

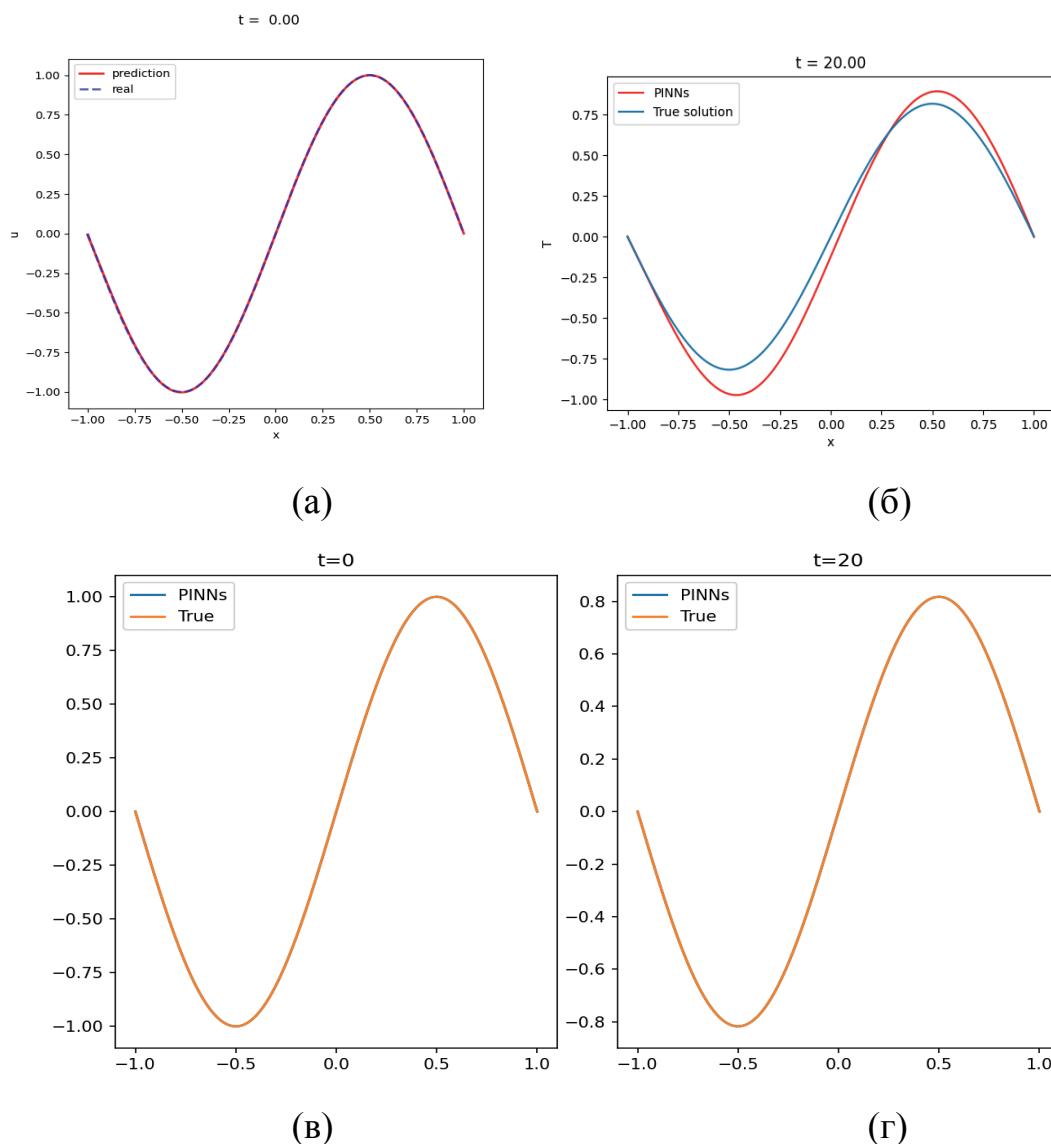


Рис. 2 – (а)- Решение PINNs на начальный момент времени; (б) – Решение PINNs на момент времени  $t = 20$ ; (в) – Решение RAR PINNs на начальный момент времени; (г) – Решение RAR PINNs на момент времени  $t = 20$

На рисунке 3 изображена абсолютная ошибка решения на всей области для PINNs и RAR PINNs. По абсолютной величине ошибка модифицированного алгоритма не превосходит  $2 * 10^{-4}$ , в то время как в ошибка PINNs достигает 0,4.

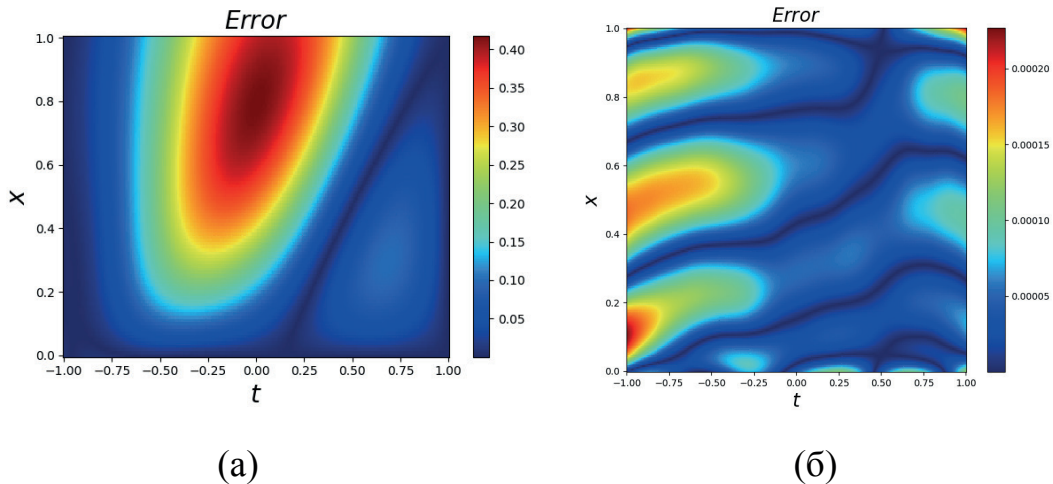


Рис. 3 – (а)- Абсолютная ошибка для PINNs; (б) – абсолютная ошибка для RAR PINNs

На рисунке 3 представлена ошибка в  $L_2$  норме для уже обученной сети при различном уменьшении сетки (в 2, 3, 5, 7 и 8 раз). Ошибка практически остается неизменной. Это подтверждает тот факт, что обученную модель не нужно дообучать на более мелкой сетке. Это экономит время и вычислительные ресурсы.

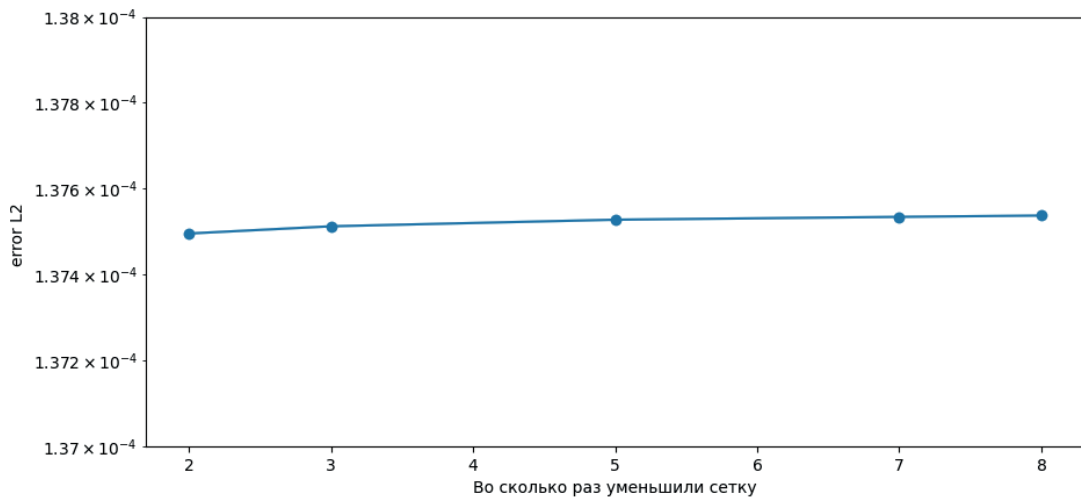


Рис.3 – зависимость нормы  $L_2$  от числа, на которое измельчили сетку

### Заключение

За последние годы исследований PINNs зарекомендовали себя в качестве хорошего инструмента для решения как прямых, так и обратных

задач, основанных на дифференциальных уравнениях. В частности, чтобы найти решение прямой задачи, необходимо задать только начальное/граничное условие, а также само дифференциальное уравнение. Алгоритм PINNs в первоначальном своем виде дает большую погрешность при решении уравнения теплопереноса, поэтому было решено рассмотреть один из вариантов модификации алгоритма. RAR PINNs удается удовлетворить заданному уравнению с погрешностью менее  $1,4 * 10^{-4}$ . Причем значение погрешности практически не изменяется при измельчении сетки и запуске уже обученной модели.

### **Список литературы:**

1. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. V.378. 2019. P.: 686-707.
2. Salvatore C., Vincenzo S.D.C., Fabio G., and oth. Scientific Machine Learning through Physics-Informed Neural Networks: Where we are and What's next
3. Chenxi Wu [et.al.], A comprehensive study of non-adaptive and residual-based adaptive sampling for physics-informed neural networks. *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*. V. 403, P.A. 2023. P.:29.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Карелина О.А.<sup>1,2</sup>

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

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

[karelina-1999@inbox.ru](mailto:karelina-1999@inbox.ru)

## STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE BEHAVIOR OF TWO- DIMENSIONAL INTERMITTENT FLOWS ON THE CHANGE OF INITIAL DATA

Karelina O.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> MEPI National Nuclear Research University's Snezhinsk Physicotechnical Institute,  
Chelyabinsk Region

<sup>2</sup> Zababakhin RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk Region

[karelina-1999@inbox.ru](mailto:karelina-1999@inbox.ru)

В работе используется методика представлений решений системы нелинейных уравнений движения в виде бесконечных тригонометрических рядов от двух пространственных переменных. При различных наборах начальных данных, строятся соответствующие нестационарные двумерные периодические по пространственным переменным  $x$ ,  $y$  течения и анализируется их поведение в зависимости от заданных начальных данных.

*Ключевые слова:* Полная система уравнений Навье-Стокса, система нелинейных уравнений движения, система обыкновенных дифференциальных уравнений, тригонометрические ряды.

In this paper we use the technique of representing solutions of the system of nonlinear equations of motion in the form of infinite trigonometric series from two spatial variables. At different sets of initial data, the corresponding unsteady two-dimensional periodic on spatial variables  $x, y$  flows are constructed and their behavior depending on the given initial data is analyzed.

*Keywords: Full system of Navier-Stokes equations, system of nonlinear equations of motion, system of ordinary differential equations, trigonometric series.*

## Введение

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

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

В системе (1) введены безразмерные переменные. При этом за масштаб скорости  $u_{00}$  взята величина  $\frac{1}{3} \cdot 10^3$  м/с, близкая к скорости звука в воздухе при нормальных условиях. За масштаб расстояния  $x_{00}$  берется величина, соответствующая геометрическим характеристикам конкретного исследуемого течения.

В данной работе рассматривается случай отсутствия зависимости от  $z$  и равенства нулю третьей компоненты вектора скорости газа:

$$\frac{\partial}{\partial z} = 0; \quad v_3 = 0$$

и вводятся обозначения:  $u = v_1, v = v_2$ . В этом случае система (1) в подробной записи имеет следующий вид

$$\begin{cases} u_t + uu_x + vv_y = \mu_0 \left( u_{xx} + \frac{3}{4} u_{yy} + \frac{1}{4} u_{xy} \right), \\ v_t + uv_x + vv_y = \mu_0 \left( \frac{3}{4} v_{xx} + v_{yy} + \frac{1}{4} u_{xy} \right), \end{cases} \quad (2)$$

а третье уравнение системы (1) выполняется тождественно.

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

В монографии [1] было предложено представлять одномерные решения полной системы уравнений Навье-Стокса в виде тригонометрических рядов.

В данной работе рассматривается случай двух пространственных переменных и с учетом результатов из работ [1-5] используются следующие представления искомых функций  $u$ ,  $v$ :

$$\begin{aligned} u(t, x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} u_{m,2}(t) \sin(my), \\ v(t, x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}(t) \sin(kx) + \sum_{m=1}^{\infty} v_{m,2}(t) \sin(my). \end{aligned} \quad (3)$$

У 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  $y$ .

Полученные представления (3) подставляются в систему (2) далее проводятся математические преобразования, а затем полученные уравнения проецируются на базисы, подробная методика получения бесконечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов  $u_{k,1}(t)$ ,  $u_{k,2}(t)$ ,  $v_{k,1}(t)$ ,  $v_{k,2}(t)$ , описана в работе [5].

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

$$v'_{\ell,1} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M m u_{k,1}(t) v_{m,1}(t) b_{k\ell m} - \frac{3}{4} \mu_0 \ell^2 v_{\ell,1}; \quad \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

$$u'_{\ell,2} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M k v_{m,2}(t) u_{k,2}(t) b_{k\ell m} - \frac{3}{4} \mu_0 \ell^2 u_{\ell,2}; \quad \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

$$v'_{\ell,2} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M kv_{k,2}(t)v_{m,2}(t)b_{k\ell m} - \mu_0 \ell^2 v_{\ell,1}; \ell = 1,2,3, \dots \quad (7)$$

Для получения единственных решений систем (4)-(7) задаются начальные данные вида:

$$u_{k,1}(0) = u_{k,1}^0; u_{k,2}(0) = u_{k,2}^0; v_{k,1}(0) = v_{k,1}^0; v_{k,2}(0) = v_{k,2}^0, \quad k = 1,2, \dots$$

такие, что числовые ряды

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}^0; \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,2}^0; \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}^0; \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,2}^0$$

сходятся абсолютно. Это соответствует тому, что для исследуемой системы заданы начальные данные

$$\begin{cases} u(t, x, y)|_{t=0} = \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,1}^0 \sin(kx) + \sum_{k=1}^{\infty} u_{k,2}^0 \sin(ky), \\ v(t, x, y)|_{t=0} = \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,1}^0 \sin(kx) + \sum_{k=1}^{\infty} v_{k,2}^0 \sin(ky). \end{cases} \quad (8)$$

Для детализации результатов расчетов вводится следующее обозначение сосчитанных вариантов. Название «*Вариант k-ℓ-m-n*» означает, что в начальных условиях для систем (5)-(8) ненулевые значения имеют только коэффициенты:

$$u_{k,1}(0) = u_{\ell,2}(0) = v_{m,1}(0) = v_{n,2}(0) = 0.1, \quad (9)$$

и у которых начальные значения для простоты последующего анализа все взяты равными одной десятой.

Далее при различных начальных данных в работе рассмотрены конкретные нестационарные двумерные периодические по пространственным переменным  $x, y$  течения газа и проанализированы их свойства.

В результате перебора начальных данных была выявлена некоторая закономерность, которая заключается в том, что если в начальный момент времени у компонент скорости  $u(t, x, y)$  и  $v(t, x, y)$  задать одинаковые ненулевые гармоники по направлениям  $x$  и  $y$ , то это число определит количество вихрей по направлению  $x$  и  $y$  в конечный момент времени.

Рассмотрим варианты «4-4-4-4», «7-7-7-7» и «9-9-9-9», в этих вариантах число слагаемых в тригонометрических суммах взято равным  $K=300$ , начальные распределения искомым функций имеют вид (10), где  $k=4, 7$  и  $9$ , соответственно для каждого из рассматриваемых вариантов.

$$\begin{cases} u(0, x, y) = 0.1 \sin(kx) + 0.1 \sin(ky), \\ v(0, x, y) = 0.1 \sin(kx) + 0.1 \sin(ky). \end{cases} \quad (10)$$

На рисунке 1 представлено поведение мгновенных линий тока для варианта «4-4-4-4» в начальный момент времени  $t=1$  и при  $t=200$ . По направлению стрелок видно, что по каждому направлению образовывается 4 области с вихрями.

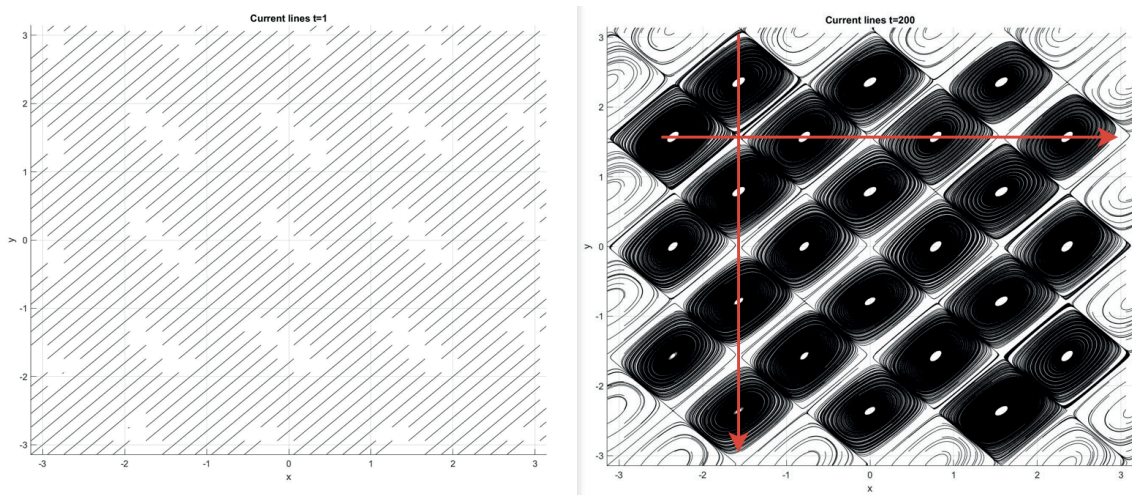


Рисунок 1 – Мгновенные линии тока варианта «4-4-4-4» при  $t=1$  и  $t=200$

На рисунке 2 представлено поведение мгновенных линий тока для варианта «7-7-7-7» в начальный момент времени  $t=1$  и при  $t=200$ . По направлению стрелок видно, что по каждому направлению образовывается 7 областей с вихрями.



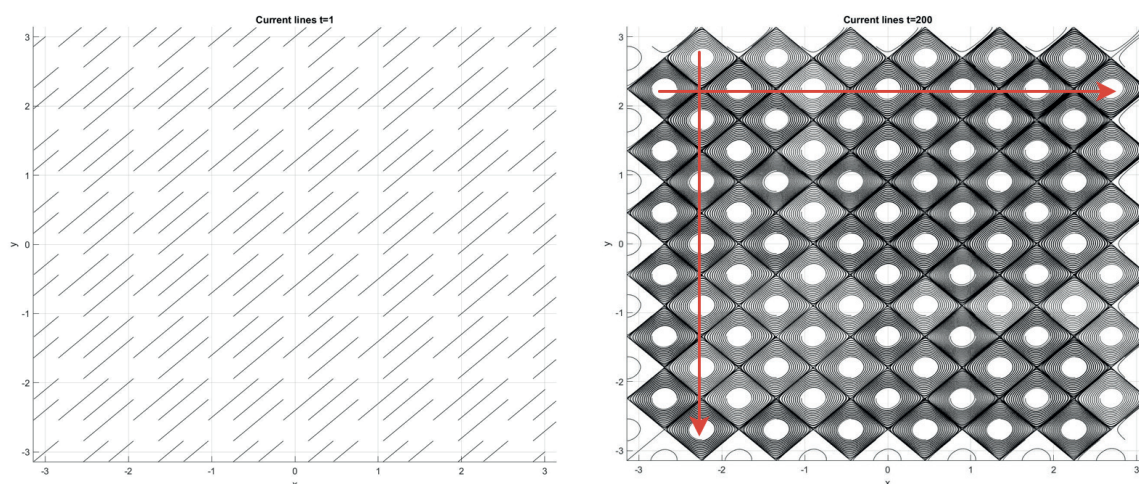


Рисунок 2 – Мгновенные линии тока варианта «7-7-7-7» при  $t=1$  и  $t=200$

На рисунке 3 представлено поведение мгновенных линий тока для варианта «9-9-9-9» в начальный момент времени  $t=1$  и при  $t=200$ . По направлению стрелок видно, что по каждому направлению образовывается 9 областей с вихрями.

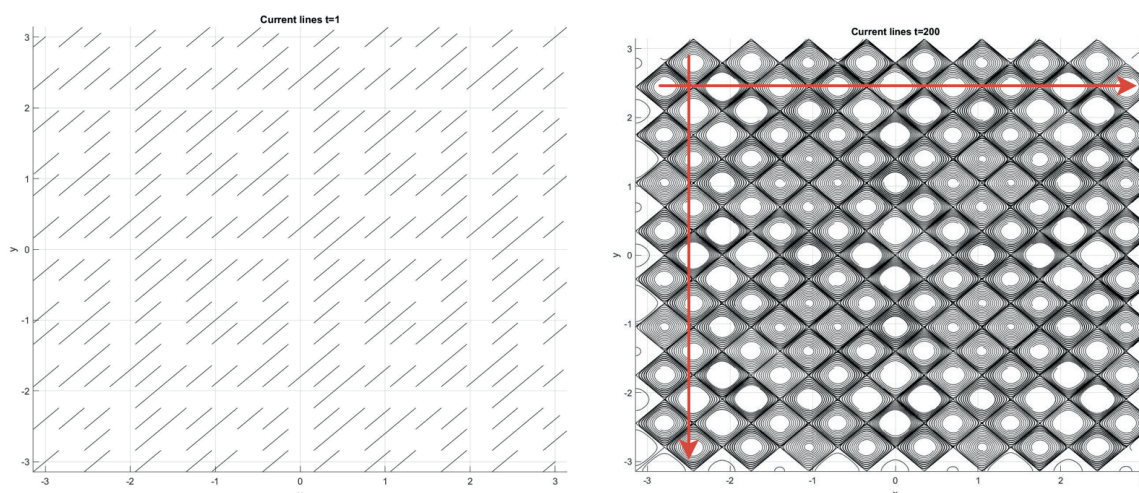


Рисунок 3 – Мгновенные линии тока варианта «9-9-9-9» при  $t=1$  и  $t=200$

В данной работе показаны примеры конкретных приближенных решений поставленных задач Коши при использовании начальных отрезков тригонометрических рядов. Коэффициенты этих начальных отрезков определяются при численном решении конечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Проанализированы свойства этих решений,

которые описывают течения вязкого теплопроводного газа при постоянных значениях плотности и температуры. В том числе выделены случаи с несколькими областями, в которых имеют место закрученные течения газа, что характерно для турбулентных течений. А так же выдвинута и подтверждена гипотеза зависимости количества закрученных областей от заданных начальных данных.

В дальнейшем планируется продолжить изучение получаемых течений в зависимости от заданных начальных условий, изучить интегральные характеристики полученных течений, а так же произвести разностный счет для сравнения.

### **Список литературы:**

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск: Наука, Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 91 с.

2. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Сходимости бесконечных тригонометрических рядов, решающих уравнение Бюргерса. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. 34 с.

3. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргерса тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, том 11, № 4, с. 305-318.

4. Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. Нестационарные двумерные периодические решения уравнений движения. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. 57 с.

5. Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. Представление решений системы уравнений движения с помощью тригонометрических рядов // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2023, том 12, № 1, с. 39-51.

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ КАПРОЛОНА

*Кушнир Павел Олегович<sup>1,2</sup>,*

*Шульгин Алексей Николаевич<sup>1</sup>, Кушнир Оксана Станиславовна<sup>1</sup>.*

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

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

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

## FEATURES OF CAPROLON PROCESSING

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

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

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

### **Аннотация.**

Цель: Увеличение эффективности обработки капролона.

Метод: Определения бездефектных факторов сверления и назначения режимов резания.

Результат: При правильном режиме резания, геометрии и эксплуатации режущего инструмента при механической токарной обработке капролона можно достичь высокого качества деталей и повысить производительность процесса.

Выводы: Планируется повышение качества токарной обработки капролона с использованием новых технологических разработок в дальнейшем.

### **Abstract.**

Background: Increasing the efficiency of caprolon processing.



Methods: Determination of defect-free drilling factors and assignment of cutting modes

Result: With the correct cutting mode, geometry and operation of the cutting tool during mechanical turning of caprolon, high quality parts can be achieved and process productivity can be increased

Conclusion: It is planned to improve the quality of caprolon turning using new technological developments in the future.

**Ключевые слова:** капролон; обработка капролона.

**Keywords:** caprolon; caprolon treatment.

Капролон - это конструкционный полимер, который отличается хорошими антифрикционными свойствами и является диэлектриком. Материал износостойкий и может работать в парах трения. Он имеет высокое усталостное сопротивление и применяется в машиностроении, судостроении.

Капролон более чем в шесть раз легче стали, разнообразие его применения значительно облегчает конструкции. Капролон - полимер, который успешно сочетает высокую механическую прочность с эластичностью в широком диапазоне температур. Изготовленные из него изделия имеют эрозионную стойкость и могут функционировать в различных агрессивных средах, включая горюче-смазочные жидкости, органические растворители, спирты, щелочи.

### **Обработка точением:**

При обработке полимерных материалов, таких как капролон, важно обеспечить высокое качество поверхности деталей. Допуски при токарной обработке для полимерных деталей обычно шире из-за их большого коэффициента теплового расширения. Капролон обрабатывается основными видами токарной обработки, но имеет особенности - низкую теплопроводность

и температуру плавления, что может привести к подплавлению при повышенном трении инструмента, а также к изменению размеров отверстий из-за упругости материала.

### **Сверление отверстий**

Для сверления заготовок капролона рекомендуется использовать спиральные сверла из быстрорежущей стали с охлаждением водой или сжатым воздухом из-за тепловыделения. Регулярно вынимать сверло из места сверления, особенно при глубоких отверстиях. Для отверстий больших диаметров уменьшить толщину перемычки сверла и работать последовательно с меньшими диаметрами. Для отверстий диаметром более 100 мм использовать плоский токарный резец. При сверлении сквозных отверстий уменьшить подачу в конце процесса обработки, чтобы избежать выламывания кромки. Применять механические подачи, чтобы избежать прихвата и разрушение пластика.

При сверлении отверстий диаметром от 5 до 30 мм необходимо использовать сверло на 0,1 мм больше, чем диаметр отверстия из-за усадки материала. Биение сверл в шпинделе станка не должно превышать 0,05 мм для предотвращения разбивки отверстия.

### **Температурное влияние во время обработки:**

При обработке деталей из капролона важно не превышать температуру 120-160 °С. Чтобы повысить производительность, необходимо интенсивно охлаждать зону резания и режущий инструмент. Однако использование традиционных охлаждающих средств ограничено из-за влагопоглощения материала. Для охлаждения можно использовать сжатый воздух. Изделия из капролона выдерживают воздействие агрессивных факторов без потери своих характеристик. Полиамид-6 подходит для обработки на стандартных металлорежущих станках. Технические характеристики капролона включают плотность, рабочую температуру, электрическую прочность и другие свойства.

Улучшение механических свойств капролона во время охлаждения улучшает обрабатываемость и качество поверхности.

### **Результаты и выводы**

Анализ современного состояния научных исследований по обработке капролона показал высокий уровень проработки вопросов, связанных с решением частных задач по обработке материалов, однако, в привязке к обработке капролона необходимо иметь в виду:

#### 1. Основные преимущества полиамида 6:

- устойчивость к коррозии, многим агрессивным средам;
- высокая химическая стойкость;
- уникальный эффект самосмазывания;
- способность поглощать вибрацию, динамические нагрузки;
- биологическая инертность;
- долговечность;
- высокая прочность;
- стойкость к истиранию;
- легко обрабатывается и др.

### **Постановка цели и задачи исследования**

В настоящее время процесс обработки капролона и полимерных материалов целиком не изучен. В некоторых работах рассмотрены частные вопросы механической обработки композиционных материалов.

Основной **целью** исследований, выполненных в работе, является увеличение эффективности обработки капролона и улучшение качества обрабатываемых поверхностей за счет определения бездефектных факторов сверления и назначения режимов резания.

Для достижения поставленной цели возникла необходимость решить следующие **задачи**:

1. Ввиду ограниченности в условиях реального производства возможности проведения практических исследований по определению рациональных

режимов резания и отсутствии дополнительного материала, необходимо разработать силовую модель резания композиционного материала. При разработке модели учесть ранее установленную схему заточки инструмента и параметры базового материала. Проверить работоспособность разработанной модели.

2. На основе полученных данных разработать методику расчетного определения режимов резания с учетом технологических ограничений на процесс обработки капролона. Провести анализ расчетов с возможностью получения рациональных режимов резания для всех типов базовых материалов и всей номенклатуры. Определить влияние геометрии и фактора затупления инструмента на процесс обработки.

3. Сформировать комплекс технологических решений и разработать технологические рекомендации для бездефектной обработки капролона.

#### **Заключение:**

При соблюдении режимов резания, геометрии режущего инструмента, правильной его эксплуатации при механической токарной обработке капролона обеспечивается качество получаемых деталей и большая производительность.

В связи с этим актуальным является повышение качества токарной обработки капролона, в том числе с использованием новых технологических разработок, что планируется в дальнейшем исследовать и реализовать.

#### **Список литературы:**

1. Антропова Н. И. и др. Капролон, его свойства, получение и применение. Л.: ЛД НТП, 1966. - 120 с.
2. Богданов В. М. Исследование процесса резания пластмасс: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Томск, 1967. 16 с.

3. Режимы резания и геометрия инструмента для обработки пластмасс, применяемых в станкостроении./Под ред. П. П. Грудова. М.: ЦБТИ,1956.-48 с.
4. Амосов И. С., Скраган В. А. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке. Л.: - М.: МАТТТГИЗ., 1953. - 70 с.
5. ГОСТ 3266-81 Метчики машинные и ручные конструкция и размеры. Дата введения 1982-07-01. Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 1981-01-29. N 328 срок введения установлен с 01.07.82 взамен ГОСТ 3266-71. ИЗДАНИЕ (февраль 2003 г.) с Изменением N 1, принятым в январе 1999 г.

**МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ  
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ  
В ХОДЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

**Латыпов А.А.<sup>1,2</sup>, Лебедев С.Н.<sup>1,2</sup>, Овечкин А.А.<sup>1</sup>**

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

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

**LASER RADIATION ABSORPTION MODEL FOR NUMERICAL  
SIMULATION OF PROCESSES OCCURRING IN THE COURSE OF  
INERTIAL CONFINEMENT FUSION**

**Latypov A.A.<sup>1,2</sup>, Lebedev S.N.<sup>1,2</sup>, Ovechkin A.A.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Zababakhin RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk Region.*

<sup>2</sup> *MEPI National Nuclear Research University's Snezhinsk Physicotechnical Institute,  
Chelyabinsk Region*

Была разработана с учётом мирового опыта математическая модель рефракции, отражения и поглощения лазерного излучения, которая будет применена для решения задач прогнозирования поведения перемешивания и абляции на поверхности термоядерной мишени, а также изучения течений излучающей газоплазменной среды переменного ионизационного состава с частичным выходом излучения.

Была проведена проверка работоспособности элемента модели, касающегося расчёта поглощения энергий в области закритической плотности. Было показано качественное соответствие с аналитическим решением в случае задачи на конечной области при однородном профиле диэлектрической проницаемости.

*Ключевые слова: Математическое моделирование, инерциальный термоядерный синтез, поглощение лазерного излучения, критическая плотность.*

Mathematical model of refraction, reflection and absorption of laser radiation was developed based on previous scientific experience. This model will be used in for computing problems of behavior prognosis of ablation and mixing on surface of thermonuclear target and also in research of radiating flows of gas-plasma medium of alternating ionizing composition with partial radiation yield.

Performance conformation of model element for computation of absorption in region of critical density was carry out. Analytic correspondence was shown in case of the problem with finite range with homogeneous profile of dielectric permittivity.

*Keywords: Mathematical modeling, inertial confinement fusion, absorption of laser radiation, critical density.*

## **Введение**

Увеличение доли применения лазеров в крупных научных исследования и проектах требует компьютерного моделирования. Необходимость в последнем возникает не только как средство верификации натуральных экспериментов, но и как цифровой двойник опытных и производственных установок. В частности, возникает потребность в математическом моделировании процессов, возникающих в ходе взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с веществом. Примером явлений, которые моделируются, является управляемый термоядерный синтез. Инерциальный управляемый термоядерный синтез (или ИТС) – разновидность термоядерного синтеза, особенность которой в удержании топлива за счёт собственных сил инерции, проявляющихся в результате процессов взаимодействия лазерного или вторичного излучения с веществом [1].

На момент написания данной работы уже известны различные модели поглощения лазерного излучения (ЛИ) как зарубежного [2], так и отечественного происхождения [3]. В ходе их изучения предлагается некоторая обобщенная модель, работоспособность которой будет проверена путём расчёта пробной задачи на основе задачи полубесконечного слоя однородного вещества. Модель, после успешной проверки, может быть применена для

решения задач, касаемо прогнозирования поведения перемешивания и абляции на поверхности термоядерной мишени, а также изучения течений излучающей газоплазменной среды переменного ионизационного состава с частичным выходом излучения.

Рассмотрение данных исследуемых случаев остаётся актуальным ввиду того, что на понимании этих процессов основывается: оптимальное построение мишеней, подбор её состава и геометрических размеров, что позволят достигнуть контроля над ИТС;

В данной статье демонстрируется математическая модель рефракции, отражения и поглощения ЛИ на основе существующих разработок. Результат планируется применить для исследований поведения мишеней под воздействием лазерного излучения и возникающего жёсткого рентгеновского излучения.

## 1. Модель поведения лучей лазерного излучения

### 1.1 Модель среды

Для расчётов параметров среды, применяется модель квазинейтральной плазмы, по которой для вычисления плотности электронов используется формула

$$n_e = \langle Z \rangle n_i = \rho \cdot \frac{\langle Z \rangle N_A}{A} = \frac{\langle Z \rangle \rho_{\text{плазмы}}}{m_0} = \frac{\langle Z \rangle \rho_{\text{плазмы}}}{1.66 \cdot 10^{-24} \cdot \langle A \rangle} \quad (1.1)$$

где –  $N_A$  число Авогадро,  $A$  – молярная масса.

Вычисление плотности электронов требует определение среднего заряда иона в точке, частоты электрон-ионных столкновений и кулоновского логарифма, которые будут получены неявно, по табличным данным[4].

Помимо вышперечисленных значений, в ячейке должны быть известны градиент плотности электронов  $\langle \nabla n_e \rangle$  и показатель преломления

$$\langle \eta \rangle = \sqrt{1 - \frac{\langle n_e \rangle}{n_{cr}}},$$

где  $n_{cr}$  - критическая плотность



$$n_{cr} = \frac{m_e \pi c^2}{\lambda^2 e^2},$$

$\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

Диэлектрическая проницаемость, необходимая для счёта в области закритической плотности, в ячейках будет определена в рамках модели Друде по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\omega) &= \varepsilon_1 + i\varepsilon_2, \\ \varepsilon_1 &= 1 - \frac{\omega}{1+\nu}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\omega\sqrt{\nu}}{1+\nu}, \\ \nu &= \frac{v_{ie}^2}{\omega^2}, \quad \omega = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}. \end{aligned}$$

Здесь  $\omega$  – круговая частота лазерного излучения,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $v_{ie}$  – частота электрон-ионных столкновений,  $\omega_{pe}^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m_e}$  – плазменная частота,  $\omega^2 = \frac{4\pi n_{cr} e^2}{m_e}$  – критическая частота,  $e$  – элементарный заряд,  $m_e$  – масса электрона,  $n_e$  – плотность свободных электронов,  $n_{cr}$  – критическая плотность.

В связи с таким подходом, показатель преломления можно также определить, как комплексный в виде

$$\begin{aligned} \langle \eta \rangle &= n_1 + in_2, \\ n_1 &= \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}}, \\ n_2 &= \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}}. \end{aligned}$$

## 1.2 Трассировка лучей в приближении геометрической оптики

Прежде чем вести речь о трассировке ЛИ, ведём лазерный луч как объект и его предполагаемые особенности перед входом в систему.

Лазерный луч представляет собой часть лазерного пучка – набора лучей в виде трубки, направленную вдоль оси. Его форма и вид, а также параметры задаются внутри программного комплекса. Мощность, как и интенсивность, среди таких лучей может быть распределена:

- равномерно,
- по гауссовому распределению,
- по супергауссовому распределению.

Данные лучи будут аппроксимированы в плоскости RZ линиями, каждая из которых будет нести долю мощности согласно выбранному распределению. До входа в тело и в момент входа включительно лучи не испытывают преломления.

При попадании внутрь тела и прохождении по ячейкам сетки лучи ЛИ имеют параболическую траекторию, определяемую градиентом плотности электронов. На границах ячеек возможно преломление и отражение луча.

Градиент плотности электронов будет вычислен по одной из аппроксимационных формул по плотностям и геометрии ячеек, окружающих рассматриваемую ячейку. Приведем вывод этих формул.

По теореме о градиенте имеем

$$\int (\nabla f) dS = \int f d\vec{n}$$

Полагая по теореме о среднем, что  $\int (\nabla f) dS \approx (\nabla f) \int dS$ , получаем

$$\nabla f = \frac{1}{S} \int (f) d\vec{n}.$$

Дальнейший расчёт ведётся так, что путь по области интегрирования ведётся против часовой стрелки,  $S$  – площадь области.

Для четырехугольной ячейки сетки предполагаем постоянство функции на ребрах. Тогда имеем

$$\nabla_h f = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^4 f_{i+\frac{1}{2}} \cdot \left( (\vec{n}_R)_{i+\frac{1}{2}}, \left( (\vec{n}_Z)_{i+\frac{1}{2}} \right) \right),$$

где  $f_{i+\frac{1}{2}}$  – значение функции на ребре,  $\vec{n}_{i+\frac{1}{2}}$  – внешняя нормаль к ребру ячейки.

Учитывая, что ребра являются отрезками прямых, получаем

$$\nabla_h f = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^4 f_{i+\frac{1}{2}} \cdot \left( -(Z_{i+1} - Z_i), (R_{i+1} - R_i) \right),$$

где  $R_i, Z_i$  – координаты узлов сетки.

Определение значения функции  $f_{i+\frac{1}{2}}$  на ребре будет посчитано по смежным к ребру ячейкам. Будем рассматривать шаблон, который состоит из ячейки и четырех ячеек ее окружающих (рис. 1).

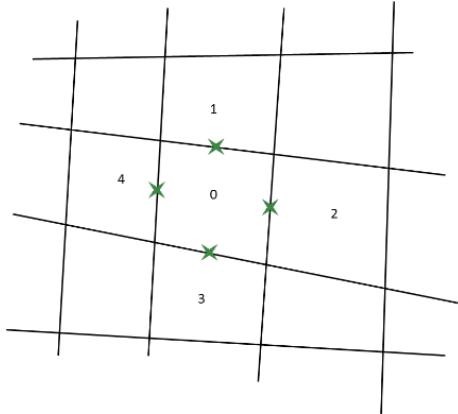


Рисунок 1 – Шаблон для градиента

В этом случае значения на ребрах определяются как полусумма значений функций из ячеек, смежных к ребру.

$$\begin{aligned}
 f_{i+\frac{1}{2},j} &= \frac{1}{2} \left( f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( f_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i+\frac{1}{2},j+1} &= \frac{1}{2} \left( f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{3}{2}} \right), \\
 f_{i+1,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2}} \right).
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Если какое-либо ребро выходит на границу области, значение функции на этом ребре полагается равным значению в центре ячейки.

В дальнейшем формулы (1.1) можно уточнять, записав их с весами

$$\begin{aligned}
 f_{i+\frac{1}{2},j} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i+\frac{1}{2},j} f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i+\frac{1}{2},j} \right) f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i,j+\frac{1}{2}} f_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i,j+\frac{1}{2}} \right) f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \right), \\
 f_{i+\frac{1}{2},j+1} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i+\frac{1}{2},j+1} f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i+\frac{1}{2},j+1} \right) f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{3}{2}} \right), \\
 f_{i+1,j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left( \alpha_{i+1,j+\frac{1}{2}} f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \left( 1 - \alpha_{i+1,j+\frac{1}{2}} \right) f_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2}} \right).
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Весы можно взять по расстояниям (рис. 2).

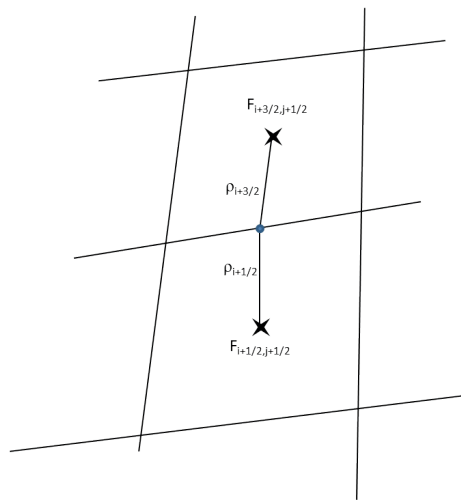


Рисунок 2 – Вычисление весов

После получения градиента плотности электронов для каждой ячейки, в которую входит луч, решаются четыре квадратных уравнения вида

$$\begin{aligned}
 A\tau^2 + B\tau + C &= 0, \\
 A &= -\frac{c^2}{4n_{cr}} \left[ \langle \nabla n_e \rangle \times \vec{l}_i \right], B = \langle \eta \rangle c \cdot \left[ \vec{s}_0 \times \vec{l}_i \right], C = \left[ (\vec{r}_0 - \vec{r}_i) \times \vec{l}_i \right]
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

для определения, с каким ребром пересекается парабола. Здесь  $\vec{l}_i$  – вектор, касательный к ребру ячейки,  $\vec{r}_i$  – координата  $i$ -ого узла ребра ячейки,  $\vec{r}_0$  – координата на входном ребре,  $\vec{s}_0$  – направление луча.

Решением нашей задачи является минимальный положительный действительный корень этих уравнений. Он определяет выходную точку

$$\vec{r}_1 = -\frac{c^2}{2n_{cr}} \langle \nabla n_e \rangle \cdot \frac{\tau^2}{2} + \vec{s}_0 \cdot c \langle \eta \rangle \tau + \vec{r}_0$$

и следующую возможную ячейку. Это позволяет начать расчёт траектории луча внутри ячейки. Также в ней должны быть известны плотность электронов  $\langle n_e \rangle$ , её градиент  $\langle \nabla n_e \rangle$  и показатель преломления.

Для обеспечения корректной работы модели выводится специальный критерий, определяющий момент перехода от приближения геометрической оптики к волновой, то есть в момент приближения значения плотности электронов к значению критической плотности.

$$\langle n_e \rangle_2 + \beta \cdot \lambda |\langle \nabla n_e \rangle_2| > \alpha n_{cr}, \quad (1.5)$$

где  $\alpha \approx 0.8, \beta \approx 1$ .

При отражении для определения входных параметров ячейки, в которую отразился луч, используются

$$\vec{r}_0 = \vec{r}_1, \vec{s}_0 = \vec{s}_1 - 2\vec{n}_1 \cdot (\vec{s}_1 \cdot \vec{n}_1),$$

$\vec{n}_1$  – нормаль к ребру, на котором лежит точка  $\vec{r}_1$ .

Луч может также отразиться от оси системы.

Если луч проходит в следующую ячейку, определяется угол поворота.

Для этого вычисляется скорость

$$\begin{aligned} \vec{V}_2 &= \alpha \vec{n}_1 + \beta \vec{l}_1, \\ \alpha &= c \langle \eta_1 \rangle \sqrt{(\vec{s}_1 \cdot \vec{n}_1)^2 + \left( \frac{\langle \eta_2 \rangle}{\langle \eta_1 \rangle} \right)^2} - 1, \\ \beta &= c \langle \eta_1 \rangle (\vec{s}_1 \cdot \vec{l}_1), \\ \vec{l}_1 \cdot \vec{n}_1 &= 0. \end{aligned}$$

Причём должно выполняться условие

$$\sqrt{(\vec{s}_1 \cdot \vec{n}_1)^2 + \left( \frac{\langle \eta_2 \rangle}{\langle \eta_1 \rangle} \right)^2} - 1 > 0. .$$

По скорости определяется вектор входного направления луча  $\vec{s}_0$  в следующей ячейке

$$\vec{s}_0 = \frac{\vec{V}_2}{|\vec{V}_2|}$$

и входная координата  $\vec{r}_0 = \vec{r}_1$ .

Луч заканчивает свое существование, если он вышел из системы через внешнюю границу или мощность (относительная), которую он несет, стала меньше некоторого  $\varepsilon \approx 10^{-8}$ .

### 1.3 Поглощение энергии лазерного излучения

Луч, двигаясь в ячейке по параболе, будет терять часть мощности. Эта потеря остается в ячейке в виде поглощенной веществом энергии.

Для определения вклада энергии потребуется определить коэффициент поглощения[5]

$$\kappa = \frac{2\omega}{c} n_2, \quad (1.6)$$

$$n_2 = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}}.$$

Здесь  $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$  – частота лазерного излучения.

Изменение мощности луча вдоль траектории определяется уравнением

$$\frac{dP}{ds} = -\kappa n_1 P,$$

где  $s = ct, n_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}}$ .

Интегрируя после замены переменных, получаем

$$P(t) = P(0) \cdot e^{-c \int_0^t \kappa n_1 dt} \quad (1.7)$$

Используется представление функций внутри ячейки в виде

$$n_e = \langle n_e \rangle + \langle \nabla n_e \rangle (\vec{r} - \langle \vec{r} \rangle),$$

$$T_e = \langle T_e \rangle + \langle \nabla T_e \rangle (\vec{r} - \langle \vec{r} \rangle). \quad (1.8)$$

Здесь  $\langle \vec{r} \rangle$  – координаты центра ячейки.

Представим в таком же виде подынтегральное выражение из (1.7):

$$ckn_1 = \langle ckn_1 \rangle + \langle \nabla(ckn_1) \rangle (\vec{r} - \langle \vec{r} \rangle) \quad (1.9)$$

Подставим в формулу (1.9) траекторию луча в ячейке

$$ckn_1 = \langle ckn_1 \rangle + \langle \nabla(ckn_1) \rangle \left( -\frac{c^2}{2n_{cr}} \langle \nabla n_e \rangle \cdot \frac{t^2}{2} + \vec{s}_0 \cdot c \langle \eta \rangle t + \vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle \right)$$

и проинтегрируем это выражение. Получим

$$P_1 = P_0 \cdot e^{Ar^3 + Bt^2 + Ct},$$

где

$$\begin{aligned} A &= -\frac{c^2}{12n_{cr}} \left( \langle \nabla(ckn_1) \rangle \right), \\ B &= \frac{1}{2} c \langle \eta \rangle \left( \vec{s}_0 \cdot \langle \nabla(ckn_1) \rangle \right), \\ C &= \langle ckn_1 \rangle + \left( (\vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle) \cdot \langle \nabla(ckn_1) \rangle \right). \end{aligned} \quad (1.10)$$

С точностью до преобразований последний коэффициент можно также представить в виде

$$C = (ckn_1)_0 \quad (1.11)$$

При этом величину  $(ckn_1)_0$  следует вычислить по температуре и плотности в точке  $\vec{r}_0$ , которые вычисляются через разложения

$$\begin{aligned} (n_e)_0 &= \langle n_e \rangle + \langle \nabla n_e \rangle (\vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle), \\ (T_e)_0 &= \langle T_e \rangle + \langle \nabla T_e \rangle (\vec{r}_0 - \langle \vec{r} \rangle). \end{aligned} \quad (1.12)$$

#### 1.4 Определение долей лазерного излучения на границе области закритической плотности

Вычисления в закритической области проводятся для определения доли отраженной энергии и для распределения поглощенной энергии в этой области.

Для описания данного элемента модели воспользуемся представлением, применяемым в ПП RALEF-2D .

Есть точка  $\vec{r}_1$ , в которой были выполнены условия отражения. Из этой точки в закритической области строится равномерная сетка вдоль оси. Для этого считается глубина закритической области – скин-слой.

Толщина скин-слоя определяется выражением

$$\lambda_{ck} = \frac{2}{\kappa(\omega)}, \quad (1.13)$$

где  $\kappa(\omega)$  – коэффициент обратно-тормозного поглощения.

Разбиение рассчитанной глубины скин-слоя на  $N$  равномерных ячеек на интервале  $[X_0^1, X_N^1]$ , где  $X^1$ - координаты, вдоль оси, направленные вдоль градиента плотности электронов. При разбиении в ячейки в них заносятся значения комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_\omega(X^1) \rightarrow \varepsilon_j$  и при этом должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\omega(X^1 < X_0^1) &= \varepsilon_0 = n_0^2; \\ \varepsilon_\omega(X^1 > X_N^1) &= \varepsilon_{N+1} = \varepsilon_\infty = n_\infty^2; \\ \text{Im}(\varepsilon_0) &= \text{Im}(\varepsilon_\infty) = 0; \\ \varepsilon_0 &> 0; \end{aligned} \quad (1.14)$$

Размер разбиваемой области может быть меньше скин-слоя, поскольку возможен случай, когда в последних ячейках плотность электронов превышает критическую, достигает локального максимума (вдоль направления луча), или когда луч доходит до границы счётной области.

Сетка на выбранном интервале будет строиться по узлам, которые находятся как точки пересечения луча, направленного вдоль градиента электронной плотности в точке  $\vec{r}_i$ , с рёбрами ячеек двумерной сетки. Размер ячеек будет зависеть от размерности системы. В случае попадания ячеек новой сетки на границу старых, то значение диэлектрической проницаемости в ней будет определено как среднее значение меж величин из двух ячеек.



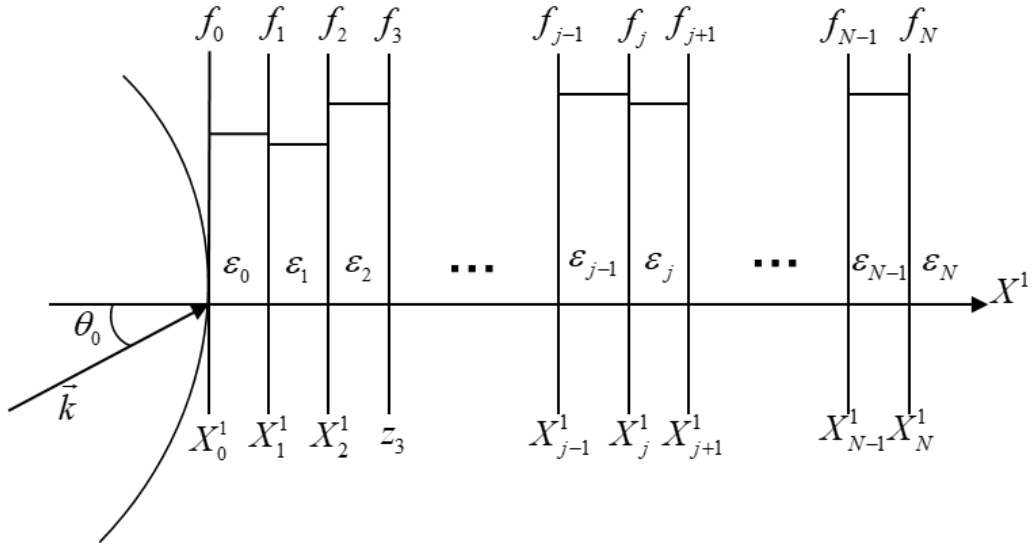


Рисунок 3 - Разбиение слоями закритической области

Во всех дальнейших формулах под  $X^1$  понимаются безразмерные координаты:

$$X^1 = \frac{\omega}{c} z^1 = \frac{2\pi z^1}{\lambda}$$

где  $z^1$  – реальная координата.

Далее идет выбор режима поляризации лазера, то есть выбор s- или p-поляризации лазерного излучения исходя из начальных данных задачи. Выбор влияет на дальнейшие вычисления.

Как параметр модели, выбрана круговая поляризация. Её учёт поляризации ведётся следующим образом: в момент расчёта луча в закритической области, он делится пополам, и выделяемая ими мощность подсчитывается независимо друг от друга как две независимые составляющие. Отражённая часть суммируется и отправляется в систему в одном луче.

Далее приведена последовательность вычислений, касающихся определения коэффициентов, отвечающих за доли поглощённой и отражённой составляющих мощности лазерного луча.

1. Расчёт  $k_j$  и  $\Phi_j$ :

$$\begin{aligned} k_j &= k_j' + ik_j'' = \sqrt{\varepsilon_j - n_0^2 \sin^2(\theta_0)}, \\ \Phi_j &= k_j (X_j^1 - X_{j-1}^1); \\ \Phi_0 &= 0; j = 0, 1, \dots, N. \end{aligned} \tag{1.15}$$

2. Расчёт  $G_j$ ,  $H_j$  и  $\gamma_j$ :

$$\begin{aligned}
 H_j &= G_j \cdot G_{j-1} \cdot \dots \cdot G_0; \\
 G_j &= 0.5 \begin{pmatrix} (1+\gamma_j)\exp(i\Phi_j) & (1-\gamma_j)\exp(-i\Phi_j) \\ (1-\gamma_j)\exp(i\Phi_j) & (1+\gamma_j)\exp(-i\Phi_j) \end{pmatrix}; \\
 \gamma_j &= \begin{cases} \frac{k_j}{k_{j+1}}, s\text{-пол.} \\ \frac{\varepsilon_{j+1}k_j}{k_{j+1}\varepsilon_j}, p\text{-пол.} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

Ввиду присутствия увеличивающихся и уменьшающихся экспонент, их постоянное перемножение может вызвать накопление арифметической ошибки.

Для её исключения ведётся расчёт  $\tilde{G}_j$  и  $\tilde{H}_j$ :

$$\begin{aligned}
 \tilde{H}_j &= \tilde{G}_j \cdot \tilde{G}_{j-1} \cdot \dots \cdot \tilde{G}_0; \\
 \tilde{G}_j &= \exp(-\sigma_j) G_j; \\
 \sigma_j &= k_j^+ (X_j^1 - X_{j-1}^1) \geq 0; j = 1, \dots, N; \\
 \sigma_0 &= 0;
 \end{aligned} \tag{1.17}$$

3. Расчёт  $r$ ,  $p$ ,  $C_j^+$ ,  $C_j^-$ :

Далее ведётся расчёт амплитуды отражения  $r$

$$r = \frac{-\tilde{H}_{N,21}}{\tilde{H}_{N,22}}, \tag{1.18}$$

где 21 и 22 это номера столбца и строки в матрице  $\tilde{H}_N$ ,

расчёт амплитуды прохождения  $p$ :

$$p = \frac{\exp\left(-\sum_{j=1}^N \sigma_j\right) \cdot \left(\prod_{j=0}^N \gamma_j\right)}{\tilde{H}_{N,22}}, \tag{1.19}$$

расчёт амплитуд  $C_j^+$ ,  $C_j^-$ :

$$\vec{C}_{j+1} = \begin{pmatrix} C_{j+1}^+ \\ C_{j+1}^- \end{pmatrix} = \tilde{G}_j \vec{C}_j = \tilde{G}_j \begin{pmatrix} C_j^+ \\ C_j^- \end{pmatrix} = e^{\sum_{i=1}^j \sigma_i} \tilde{H}_j \vec{C}_0. \tag{1.20}$$

Стоит упомянуть и возникающие граничные условия:

$$\begin{aligned}
 C_0^+ &= 1, \\
 C_0^- &= \frac{-\tilde{H}_{N,21}}{\tilde{H}_{N,22}}, \\
 C_{N+1}^+ &= \frac{\exp\left(-\sum_{j=1}^N \sigma_j\right) \cdot \left(\prod_{j=0}^N \gamma_j\right)}{\tilde{H}_{N,22}}, \\
 C_{N+1}^- &= 0.
 \end{aligned} \tag{1.21}$$

4. Расчёт коэффициентов отражённой, поглощённой и переданной энергий ЛИ:

Коэффициент отражённой энергии ЛИ рассчитывается как

$$R_{refl} = \left| \frac{C_0^-}{C_0^+} \right|^2 = |r|^2. \tag{1.22}$$

Коэффициент энергии ЛИ, вышедшей за область расчёта:

$$R_{tr} = \frac{|p|^2}{\cos \theta_0} \cdot \begin{cases} \frac{\operatorname{Re}(k_{N+1})}{n_0}, s - \text{пол.} \\ n_0 \cdot \operatorname{Re}\left(\frac{k_{N+1}}{\varepsilon_{N+1}}\right), p - \text{пол.} \end{cases} \tag{1.23}$$

Балансировка энергии для луча достигается следующим образом: считается, что луч, приходящий на ячейку с критической областью, делится на отражённый с мощностью, равной входящей в ячейку, умноженной на коэффициент отражения (1.22). Оставшаяся энергия разделяется на поглощённую и вышедшую за пределы системы (1.23). Коэффициенты поглощения рассчитываются для каждой ячейки скин-слоя как

$$R_{abs_j} = R_{abs,sec_j} + R_{abs,osc_j},$$

$$R_{abs,sec_j} = \left[ |C_j^+|^2 \left( 1 - e^{-2\text{Im}(k_j)(X_j^1 - X_{j-1}^1)} \right) + |C_j^-|^2 \left( e^{2\text{Im}(k_j)(X_j^1 - X_{j-1}^1)} - 1 \right) \right] \cdot \begin{cases} \frac{\text{Re}(k_j)}{n_0 \cos \theta_0}, s\text{-пол.} \\ \frac{n_0 \text{Re}\left(\frac{k_j}{\varepsilon_j}\right)}{\cos \theta_0}, p\text{-пол.} \end{cases}$$

$$R_{abs,osc_j} = \text{Im} \left[ C_j^+ C_j^{*-} \left( e^{2\text{Re}(k_j)(X_j^1 - X_{j-1}^1)} - 1 \right) \right] \cdot \begin{cases} \frac{2 \text{Im}(k_j)}{n_0 \cos \theta_0}, s\text{-пол.} \\ \frac{2n_0 \text{Im}\left(\frac{k_j}{\varepsilon_j}\right)}{\cos \theta_0}, p\text{-пол.} \end{cases} \quad (1.24)$$

где  $R_{abs_j}$  - коэффициент поглощения в  $j$  интервале,  $R_{abs,sec_j}$  - всюду неотрицательная часть коэффициента, отвечающая за монотонное затухание ЛИ,  $R_{abs,osc_j}$  - знакопеременная часть коэффициента, учитывающая интерференцию падающей и отражённой волн.

После подсчёта коэффициентов проводится проверка выполнения тождества

$$\sum_{j=1}^N R_{abs_j} + R_{tr} + R_{rfl} = 1 \quad (1.25)$$

Если оно не выполняется, то необходимо пересчитать коэффициенты  $R_{abs,sec_j}$  по формуле (1.26), приняв  $R_{abs,osc_j}$  равными нулю. Коэффициент  $R_{rfl}$  изменениям не подвергается.

$$\tilde{R}_{abs,sec_j} = \frac{R_{abs,sec_j}}{\sum_{j=1}^N R_{abs,sec_j}} \cdot (1 - R_{tr} - R_{rfl}) \quad (1.26)$$

Существует и иной подход к расчёту коэффициентов отражения и поглощения ЛИ на области критической плотности, основанный на формулах Френеля. Их применение для случая s- и p-поляризованного лазерного излучения позволяет получить амплитуды отражённого и преломлённого света:

$$r_s = \frac{\left| k_J - \langle \eta \rangle_i \cos \theta_i \right|^2}{\left| k_J + \langle \eta \rangle_i \cos \theta_i \right|^2}, \quad (1.27)$$

$$r_p = \frac{\left| k_J \langle \eta \rangle_i - \varepsilon_J \cos \theta_i \right|^2}{\left| k_J \langle \eta \rangle_i + \varepsilon_J \cos \theta_i \right|^2},$$

где  $k_J$  - коэффициент  $k$ , определённый в ячейке, до которой дошёл луч, идущий по закритической области,  $\langle \eta \rangle_i$  - показатель преломления в ячейке, где произошёл переход от геометрической к волновой оптике,  $\theta_i$  - угол падения к ячейке, где произошёл переход от геометрической к волновой оптике,  $\varepsilon_J$  - значение диэлектрической проницаемости, определённой в ячейке, до которой дошёл луч, идущий по закритической области.

Коэффициент отражения в таком случае равен:

$$R_{refl} = |r|^2.$$

Коэффициент поглощения будет определен как

$$R_{abs} = 1 - |r|^2.$$

Данный подход нами в рассматриваемой модели будет применяться по отношению к тестовым задачам, при необходимости сравниваться с точным решением или получений некоторого численного решения в первом приближений.

## **2. Численное исследование модели поглощения ЛИ в области закритической плотности.**

Для изучения потенциальных особенностей, которые могут находиться в рассматриваемой модели, были проведены исследования её свойств, а именно, влияния параметров расчётной сетки и вида профиля диэлектрической проницаемости на результат моделирования.

Приведём постановку задачи: с левой стороны на плоский слой вещества, расположенного в отрезке  $0 \leq z \leq z_{\max}$ , под углом  $\theta$  к нормали падает плоская монохроматическая линейно поляризованная электромагнитная волна с круговой частотой  $\omega$ . Диэлектрическая проницаемость вещества равна  $\varepsilon$ , при

$z < 0, z > z_{\max}$ , диэлектрическая проницаемость равна 1. Требуется найти коэффициенты поглощения, отражения и выхода из системы.

Определим параметры системы:

- Число ячеек счётной области: 10, 100 и 1000;
- Шаг по равномерной сетке  $h = 0.1, 0.01, 0.001$ ;
- Размер счётной области в безразмерных координатах - 1, 0.1, 0.01;
- Значение комплексной диэлектрической проницаемости в ячейке  $\varepsilon_j = -54.56 + 67.2i$ ;
- Значение комплексной диэлектрической проницаемости на границе области  $\varepsilon_0 = \varepsilon_\infty = 1$ ;
- Угол падения  $\theta = [0, 90]$ ;

Элемент модели, касающийся расчётов выделяющейся энергии ЛИ в области закритической плотности, был перенесён в ПП MATLAB. Над ним были проведены пробные вычисления сумм коэффициентов отражения  $R_{\Sigma_{rf}}$ , поглощения  $R_{\Sigma_{abs,sec}}, R_{\Sigma_{abs,osc}}$  и выхода из системы  $R_{\Sigma_{tr}}$  по формулам (1.22) - (1.24).

Была рассмотрена задача, по условиям которой в расчётной области значения диэлектрической проницаемости одинаковы и представляют собой константу. В результате была построена зависимость коэффициентов поглощения от угла падения. Вид зависимости, представленной на рисунке 4, количественно и качественно повторяет аналитическое решение, с погрешностью порядка  $10^{-12}$ . Само аналитическое решение получено для

- коэффициента отражения:

$$R_{rf} = \frac{\left| (1 - \gamma^2)(1 - e^{2ikL}) \right|^2}{D}, \quad (2.1)$$

где  $L = \frac{\omega z_{\max}}{c}$  - безразмерная координата,

$$k = k' + ik'' = \sqrt{\varepsilon^2 - \sin^2 \theta},$$

$$\gamma = \gamma' + i\gamma'' = \begin{cases} \frac{\cos \theta}{k}, & s\text{-пол.} \\ \frac{\varepsilon \cos \theta}{k}, & p\text{-пол.} \end{cases},$$

$$D = \left| (1 + \gamma)^2 - (1 - \gamma)^2 e^{2ikL} \right|^2;$$

- коэффициента выхода из системы:

$$R_{tr} = \frac{-16|\gamma|^2 e^{-2ikL}}{D}; \quad (2.2)$$

- коэффициентов поглощения:

$$R_{abs} = R_{abs,sec} + R_{abs,osc},$$

$$R_{abs,sec} = \frac{4\gamma'(1 - e^{-2k''L}) \left( |1 + \gamma|^2 + e^{-2k''L} |1 - \gamma|^2 \right)}{D}, \quad (2.3)$$

$$R_{abs,osc} = \frac{-8\gamma'' e^{-2k''L} \left[ f_1 \sin(2k'L) + f_2 (1 - \cos(2k'L)) \right]}{D},$$

где

$$f_1 = (1 - |\gamma|^2) \cos(2k'L) + 2\gamma'' \sin(2k'L),$$

$$f_2 = (1 - |\gamma|^2) \sin(2k'L) - 2\gamma'' \cos(2k'L),$$

- долей энергий на единичном интервале безразмерной координаты

$$x = \frac{\omega z}{c} \quad (0 \leq x \leq L):$$

$$\frac{dR_{abs}}{dx} = \frac{dR_{abs,sec}}{dx} + \frac{dR_{abs,osc}}{dx},$$

$$\frac{dR_{abs,sec}}{dx} = \frac{8k''\gamma' \left( |1 + \gamma|^2 e^{-2k''x} + e^{-2k''L} |1 - \gamma|^2 e^{-2k''(L-x)} \right)}{D}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dR_{abs,osc}}{dx} = \frac{-16k''\gamma'' e^{-2k''L} \left[ f_1 \cos(2k'x) + f_2 \sin(2k'x) \right]}{D},$$

В приведённом решении должны выполняться условия:

$$\int_0^L \frac{dR_{abs,sec}}{dx} dx = R_{abs,sec}, \quad \int_0^L \frac{dR_{abs,osc}}{dx} dx = R_{abs,osc}, \quad R_{tr} + R_{abs} = 1. \quad (2.5)$$

На рисунке 4 дополнительно показаны зависимости коэффициентов поглощения полученные для линейно растущего и зашумленного профилей (вид профилей представлен на рисунке 5), отличающихся от результата на

постоянном профиле на 2% и 3% соответственно. При анализе расчётов данных профилей была подтверждена зависимость результатов расчёта от шага сетки при непостоянных значениях диэлектрической проницаемости.

Для постоянного профиля был получен вид зависимости коэффициентов поглощения при угле падения в 30 градусов на единицу доли поглощённой энергии на сгущающихся сетках для оценки скорости затухания поглощения и сходимости к аналитическому решению (1.31) (рисунок 7). Для осциллирующих членов также была получена такая зависимость. Для оценки влияния размеров области, которая считается оптически толстой, на значения коэффициентов, были проведены подобные вычисления на областях, уменьшенными в 10 и 100 раз. По результатам расчётов над ними, была показана быстрая сходимость по сетке, не зависящая от размера области (рисунок 8-9). На рисунках 7-9, кривые, отвечающие за наименьший шаг сетки в серии расчётов в определённой области, сливаются с кривыми аналитического решения при выбранном масштабе графиков.

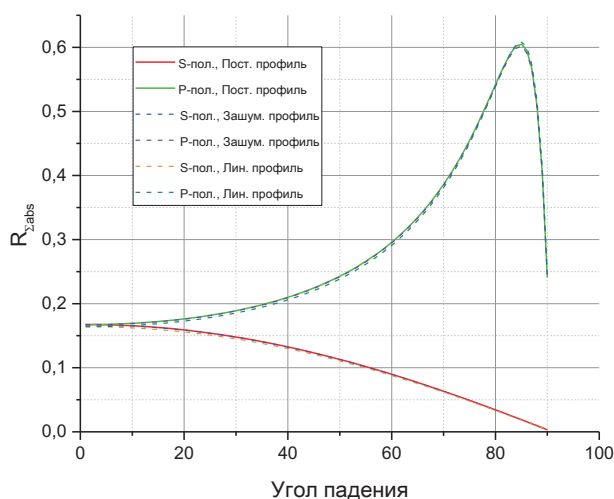


Рисунок 4 – Зависимость коэффициентов поглощения от угла падения



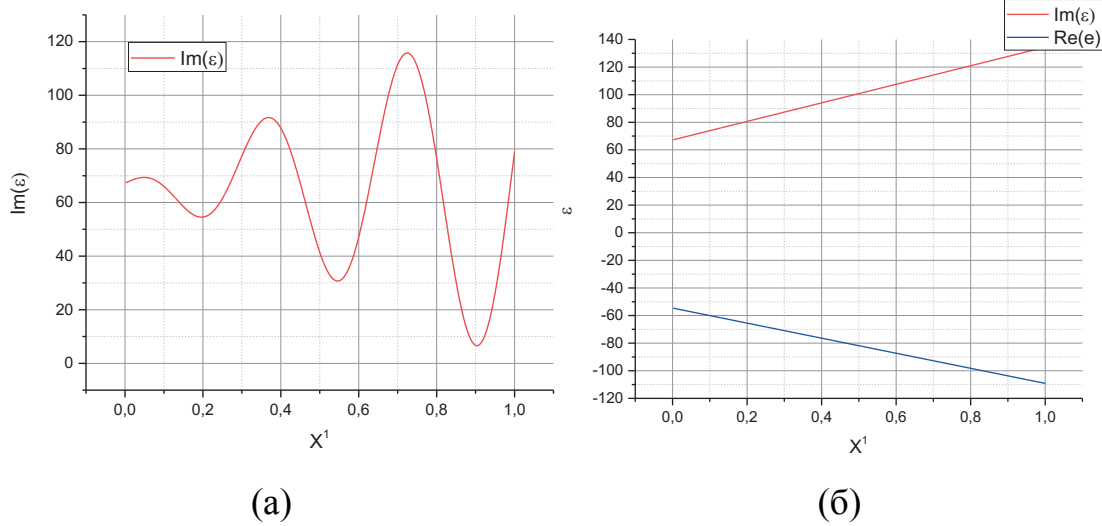


Рисунок 5 – Вид мнимой компоненты зашумленного профиля (а) и линейного профиля (б) комплексной диэлектрической проницаемости

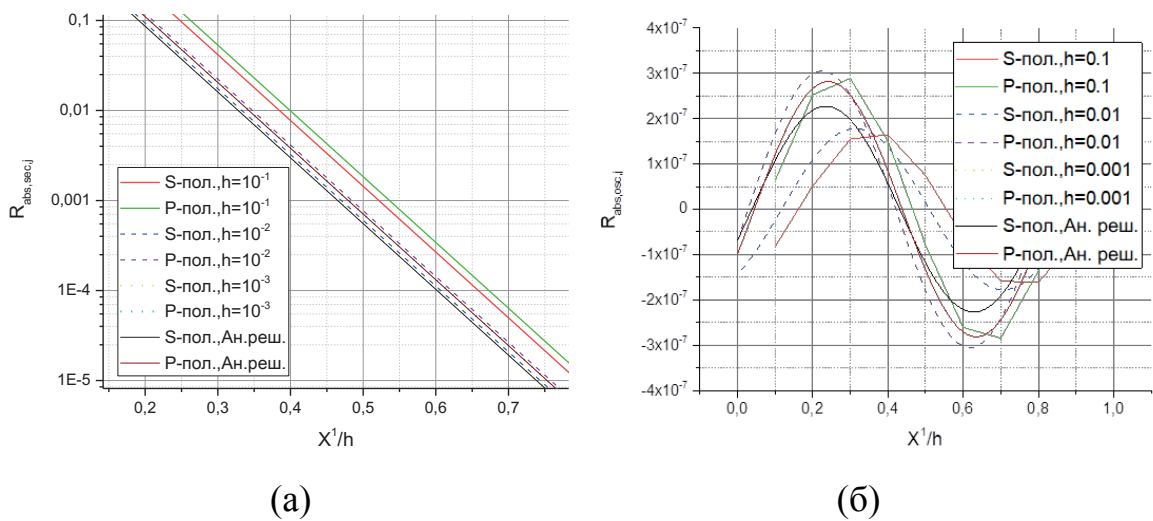


Рисунок 7 - Зависимость монотонных (а) и осциллирующих (б) коэффициентов поглощения на сгущающихся сетках для постоянного профиля диэлектрической проницаемости для области размером 1

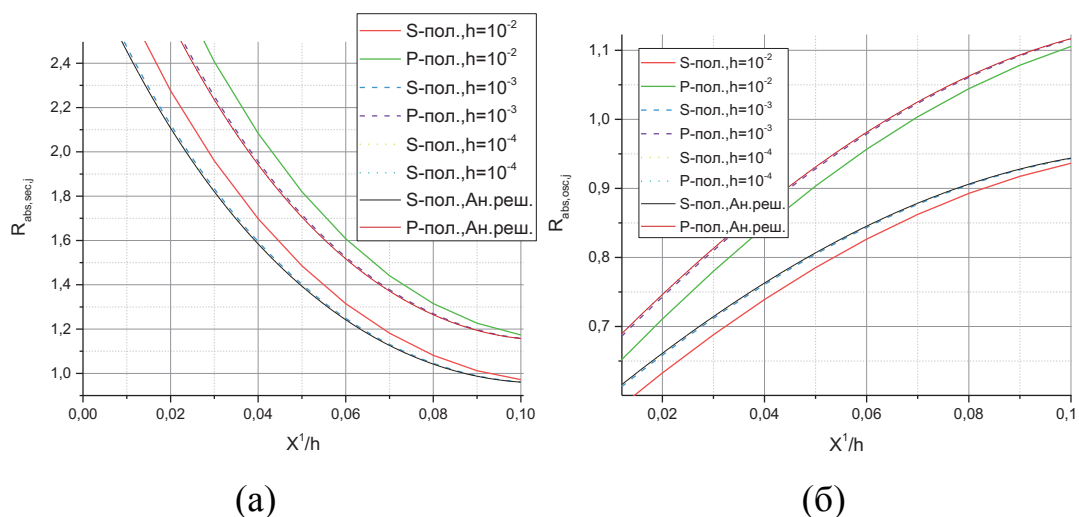


Рисунок 8 - Зависимость монотонных (а) и осциллирующих (б) коэффициентов поглощения на сгущающихся сетках для постоянного профиля диэлектрической проницаемости для области размером 0.1

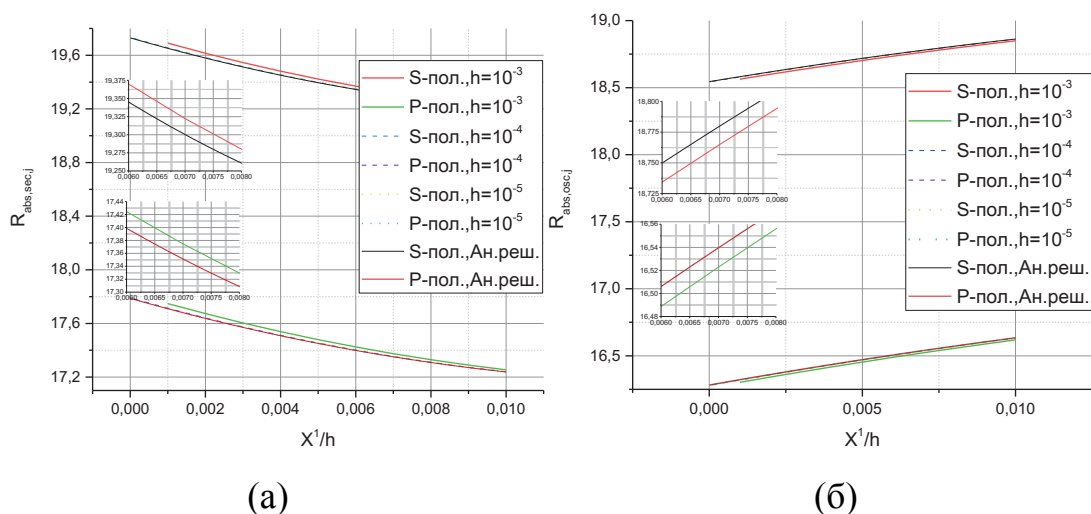


Рисунок 9 - Зависимость монотонных (а) и осциллирующих (б) коэффициентов поглощения на сгущающихся сетках для постоянного профиля диэлектрической проницаемости для области размером 0.01

### Заключение

Была построена новая модель взаимодействия лазерного излучения веществом с учётом мирового опыта в этой области, позволяющая учитывать явление рефракции ЛИ и поглощение энергии в области закритической плотности.

Был описан алгоритм трассировки лучей лазерного излучения и механизм расчёта коэффициентов поглощения, отражения и выхода из системы ЛИ при вычислении в области закритической плотности электронов.

В программном пакете MATLAB реализована модель расчёта поглощения ЛИ в закритической области.

Были проведены численные исследования, показывающие совпадение полученных результатов с аналитическим решением. Получено, что для случая постоянного профиля диэлектрической проницаемости имеет место быстрая сходимость по сетке, не зависящая от размеров области.

Дальнейшее рассмотрение модели требует построение отдельной программы или внедрение в уже существующую, поскольку для последующей работы необходима информация, которую можно получить при решении уравнений массо- и теплопереноса.

### Список литературы

---

1. Бойко В.И (Томский политехнический университет), Управляемый термоядерный синтез и проблемы инерциального термоядерного синтеза // Соросовский образовательный журнал №6, 1999, стр 97-104;

2. T.V. Kaiser, Phys.Rev. E **61**, 895(2000), 895-905.  
Doi:10.1103/PhysRevE.61,895.

3. Basko M.M., Tsygvintsev I.P., A hybrid model of laser energy deposition for multidimensional simulations of plasmas and metals // Comput. Phys. Commun., 2017. Vol. 214. PP. 59-70.

4. Ovechkin A.A., Loboda P.A., Falkov A.L. Transport and dielectric properties of dense ionized matter from the average-atom RESEOS model // HEDP. – 2016. – Vol. 20. – Pp. 38 - 54

5. Лебо И.Г., Тишкин В.Ф. Исследование гидродинамических неустойчивостей в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования. М:ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с. – ISBN 5-9221-0683-X.

## РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПО БИО-САВАРУ-ЛАПЛАСУ В ПЛОСКОЙ ТОКОНЕСУЩЕЙ СИСТЕМЕ «ФЛАЕР – ОБРАТНЫЙ ТОКОПРОВОД»

*Лубенченко Н.А., Григорьев А.Н.*

*Снежинский физико-технический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Челябинская обл., г. Снежинск*

*[lubenchenko.n@gmail.com](mailto:lubenchenko.n@gmail.com), [alex\\_nick@mail.ru](mailto:alex_nick@mail.ru)*

## CALCULATION OF FIELD DISTRIBUTION ACCORDING TO BIO- SAVART-LAPLACE IN A FLAT CURRENT-CARRYING SYSTEM “FLYER – RETURN CONDUCTOR”

*Lubenchenko N.A., Grigoryev A.N.*

*Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI, Chelyabinsk Region, Snezhinsk*

### **Аннотация.**

Приведены результаты расчета распределения магнитного поля по закону Био-Савара-Лапласа. Найдено распределения магнитного поля для разных конфигураций «флаер – обратный токопровод». Показаны возможности по максимизации скорости флаера за счет максимизации  $H_x$  компоненты поля.

### **Abstract.**

The results of calculating the magnetic field distribution according to the Biot-Savart-Laplace law are presented. The magnetic field distributions were found for different configurations “flyer – return current conductor”. The possibilities for maximizing the speed of the flyer by maximizing the  $H_x$  component of the field are shown.

*Ключевые слова:* магнитное поле; флаер; обратный токопровод; закон Био-Савара-Лапласа.

**Keywords:** magnetic field; flyer; return conductor; Biot-Savart-Laplace law.

### **Введение**

Возможность разгона пластин-ударников (флаеров, рисунок 1) до скоростей  $V > 8$  км/с с помощью импульсного магнитного поля послужила стимулом для применения и соответствующего развития мощной импульсной электрофизической техники в задачах исследования динамических свойств материалов [1, 2].

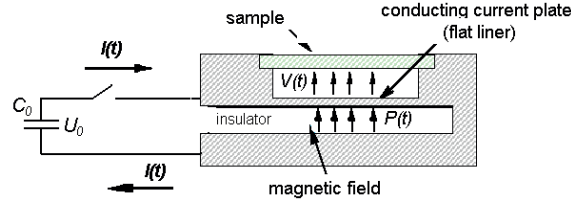
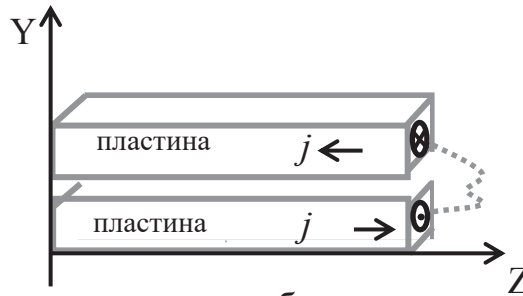


Рис.1. Пример схемы нагружения образцов ударником, где ударником служит флаер

### Расчет поля пластины с однородным током двумерная постановка

Краткая постановка задачи:



Для оценки влияние геометрии обратного токопровода на распределение тока в проводниках, была решена задача, связанная с нахождением магнитных полей в двумерной постановке вокруг тонкого флаера толщиной 1 мм и шириной 30 мм, где размер вдоль оси  $Z$  равен бесконечности. В такой постановке можно пренебречь  $z$ -компонентой  $H_z$  для поля  $H$ .

Были получены формулы для расчета  $x$ - и  $y$ -компонент полей в двумерной и трехмерной постановке из закона Био-Савара-Лапласа (1)-(3). Ток в обратном токопроводе в расчетах со направлен с осью  $Z$  и противоположно направлен во флаере [3].

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{I} [d\vec{r} \times \vec{r}]}{r^3} \quad (1)$$

$$H_x(t, u) = \frac{1}{4\pi} \iint \frac{-I(x, y) \cdot (u - y)}{|r|^3} dx dy \quad (2)$$

$$H_y(t, u) = \frac{1}{4\pi} \iint \frac{I(x, y) \cdot (t - x)}{|r|^3} dx dy, \quad (3)$$

где  $|r| = \sqrt{(t-x)^2 + (u-y)^2 + (w-z)^{2\nu}}$  ( $\nu=0$  – в случае двумерной постановки и  $\nu=1$  – в случае трехмерной постановки задачи),  $I(x, y)$  – распределение плотности тока в проводниках (направление тока совпадает с осью  $z$ ; положительное направление выбрано для обратного токопровода),  $x, y, z$  – координаты связанные с проводниками тока,  $t, u, w$  – координаты связанные с областью вокруг проводников с током (точки наблюдения).

На рисунке 2, 3, 4 представлены векторные поля напряженности магнитного поля  $H$ , рассчитанные по формулам (2) и (3). Плотность тока и область протекания отличается от случая к случаю, но суммарный ток, протекающий по проводнику остается постоянным.

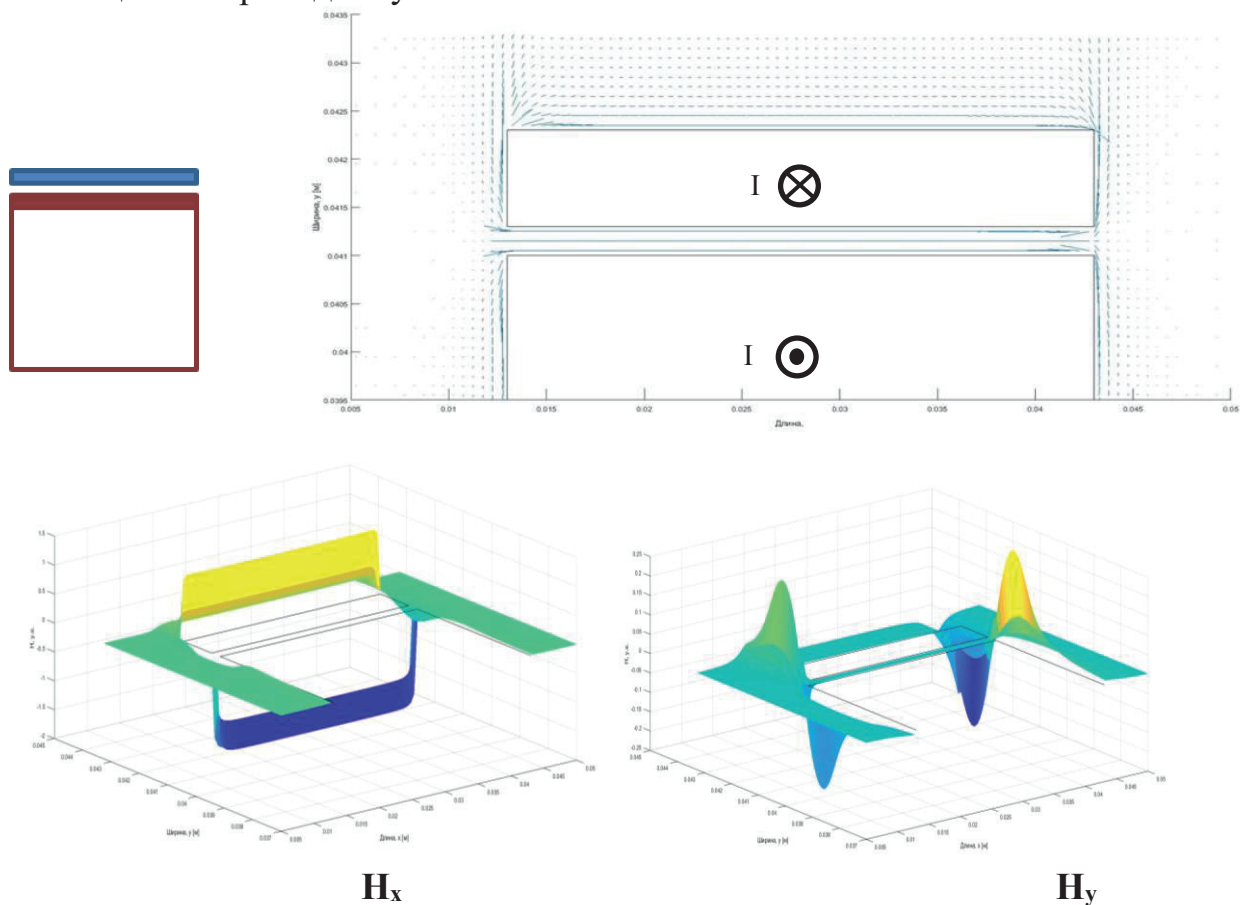
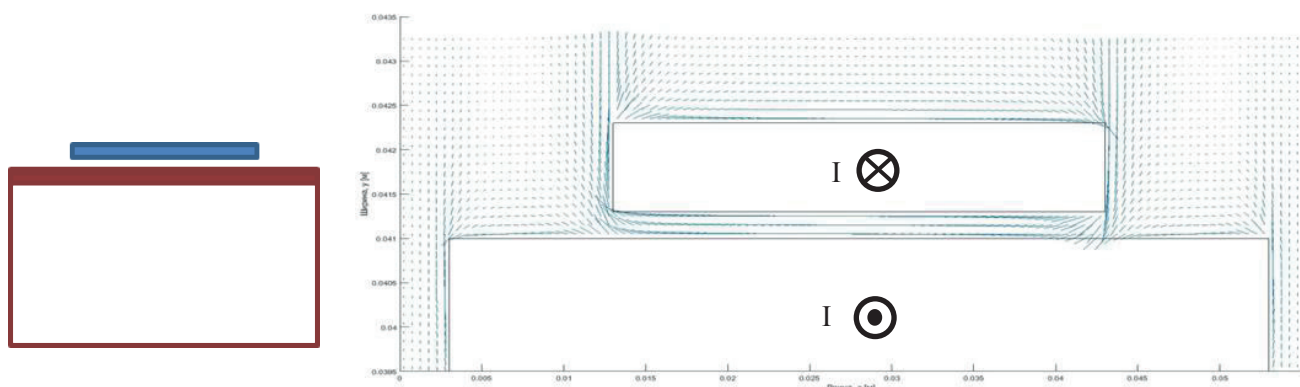
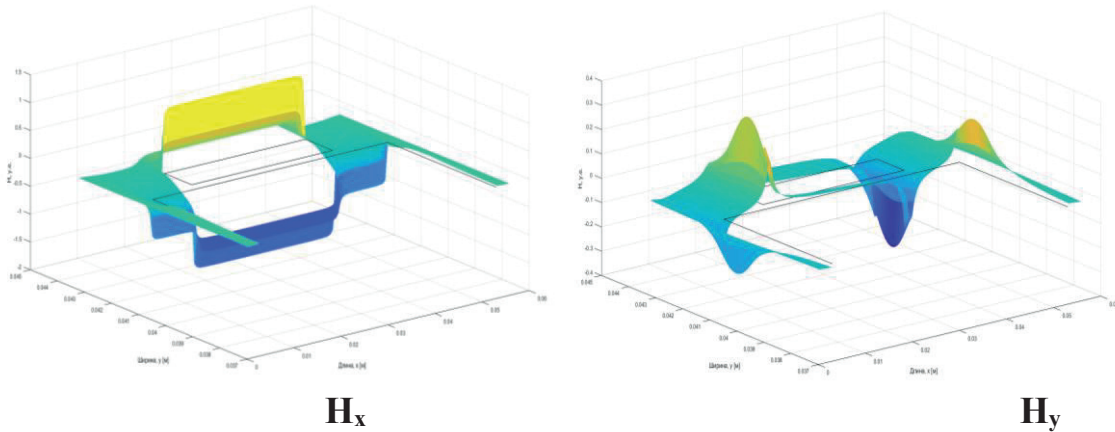


Рис.2. Векторное поле  $H$ . Ток протекает в ОТ в слое равном толщине флера



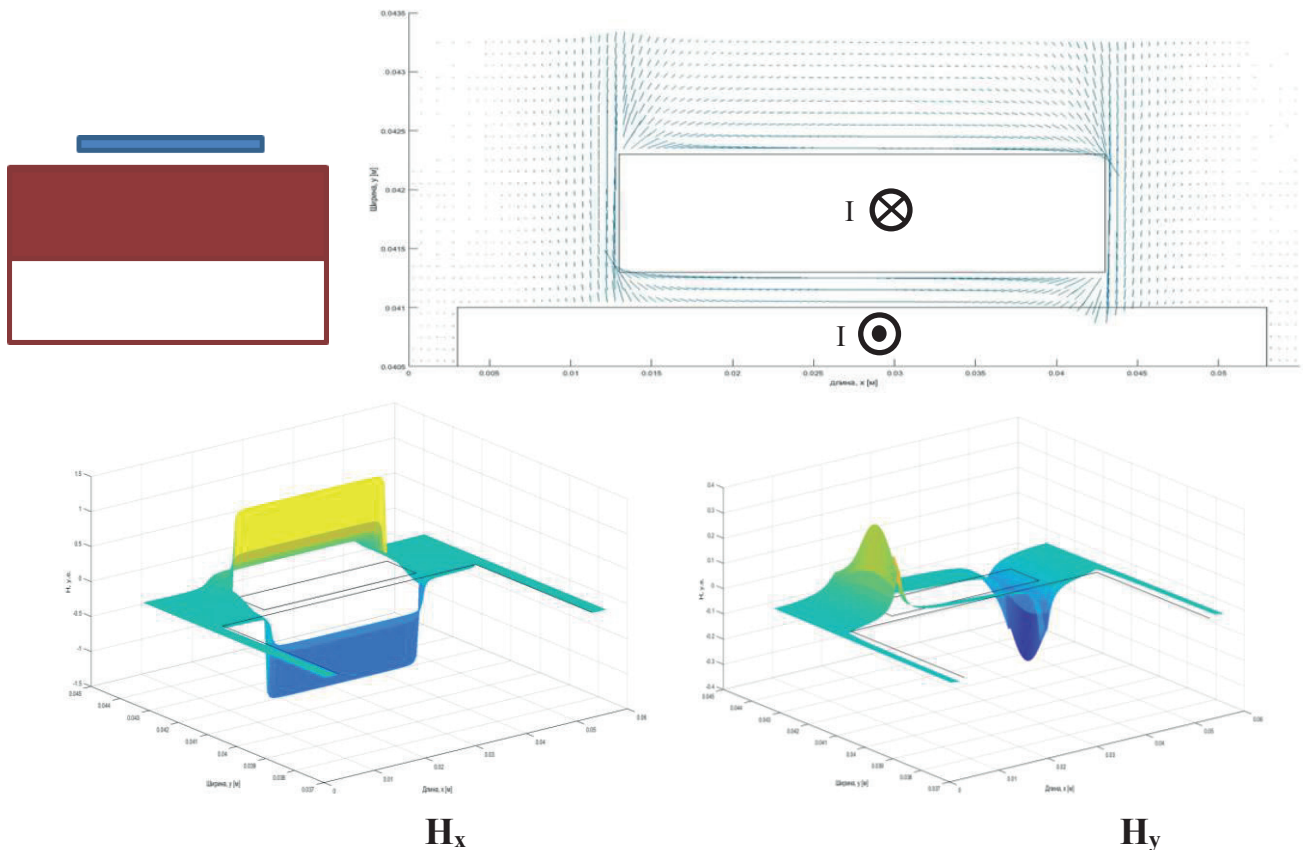




$H_x$   $H_y$

Рис.3. Векторное поле  $H$ . Ток протекает в ОТ в слое равной толщине флаера

Из сравнения рисунков 3 и 4 видно, что в случае тонкого скин-слоя в обратном токопроводе (ОТ) (рисунок 3) происходит увеличение  $H_x$  компоненты магнитного поля в зазоре «флаер – ОТ» по сравнению со случаем, когда скин-слоем занимает половину толщины ОТ (рисунок 4). В связи с чем, для увеличения  $H_x$  компоненты магнитного поля (работающей на ускорение флаера) следует минимизировать скин-слой в ОТ. Поэтому обратный токопровод необходимо изготавливать из меди (в настоящее время изготавливается из стали). При использовании стали необходимо использовать немагнитную сталь (магнитная проницаемость  $\mu_{Fe} > \mu_{Cu}$ , удельное сопротивление  $\rho_{Fe} > \rho_{Cu}$ )



$H_x$   $H_y$

Рис.4. Векторное поле  $H$ . Ток протекает в слое равном половине толщины обратного токопровода (половина обратного токопровода).

Также была решена обратная задача – распределение тока в проводнике или его смещение по известному распределению поля  $H$ . Результат, представленный на рисунке 5, был получен в приближении массива тонких бесконечных проводников круглого сечения, для которых и была решена задача оценки распределения тока по известному магнитному полю вне проводников.

$$I = 2\pi rB \approx 2\pi rH \quad (4)$$

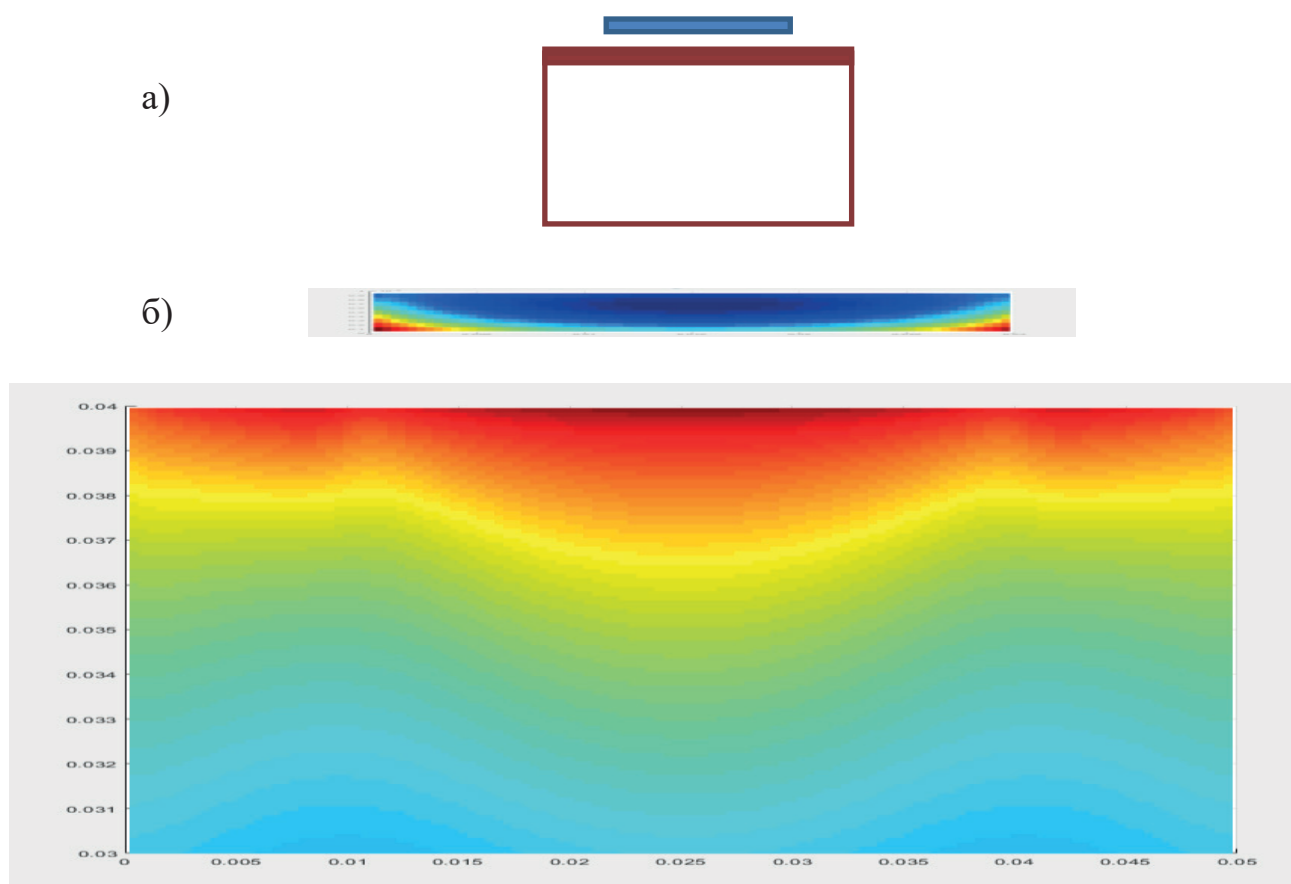


Рис.5. Распределение тока в системе «флаер – обратный токопровод»: а) начальное приближение; б) распределение тока, полученное в расчете

### Расчет поля пластины в трехмерной постановке с однородным током

В данном разделе представлены результаты численного моделирования магнитных полей, создаваемых при протекании тока в системе «флаер – обратный токопровод». Поля найдены из закона Био-Савара-Лапласа с учетом геометрии проводников в трехмерной постановке по следующим формулам (2), (3) для  $x$ - ( $H_x$ ) и  $y$ -компонент ( $H_y$ ) магнитного поля.

Моделировался ток равномерно распределённый по всему сечению флаера. Была выбрана постановка согласно рисунку 2.

Расположение флаера и обратного токопровода (ОТ) в системе координат  $XYZ$  приведено на рисунке 6.



Исследовалось изменение распределения поля вокруг флаера в двух постановках задачи:

- 1) при неизменной толщине слоя (в нашей терминологии длина флаера или  $L$ ) вдоль направления оси  $Z$  (ток течет вдоль оси  $Z$ ), но переменном количестве ячеек по толщине ( $dl \neq const$ );
- 2) при неизменной толщине ячейки вдоль  $Z$  ( $dl = const$ ), но при переменном количестве ячеек, т.е. при переменной толщине слоя ( $L \neq const$ ).

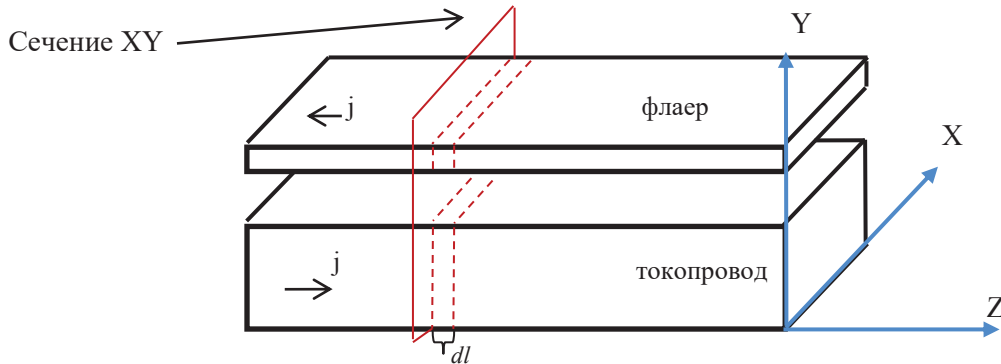


Рис.6. Взаимное расположение флаера и обратного токопровода

1. Общая толщина  $L = const$ ,  $dl$  – переменная, где  $dl$  – толщина ячейки вдоль оси  $Z$  и  $L = \sum dl$ .

На рисунках 7, 8 представлено распределение модуля напряженности магнитного поля в центральном сечении  $XY$ . Кратное трем изменение количества ячеек не меняет картину распределения поля вокруг флаера.

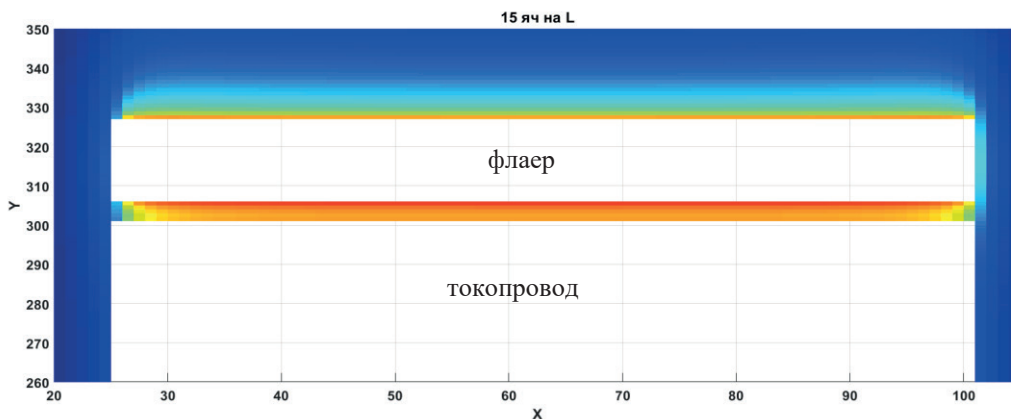


Рис.7. Распределение модуля напряженности магнитного поля в центральном сечении  $XY$ . 15 ячеек  $dl$  при  $L = 0,5$  мм

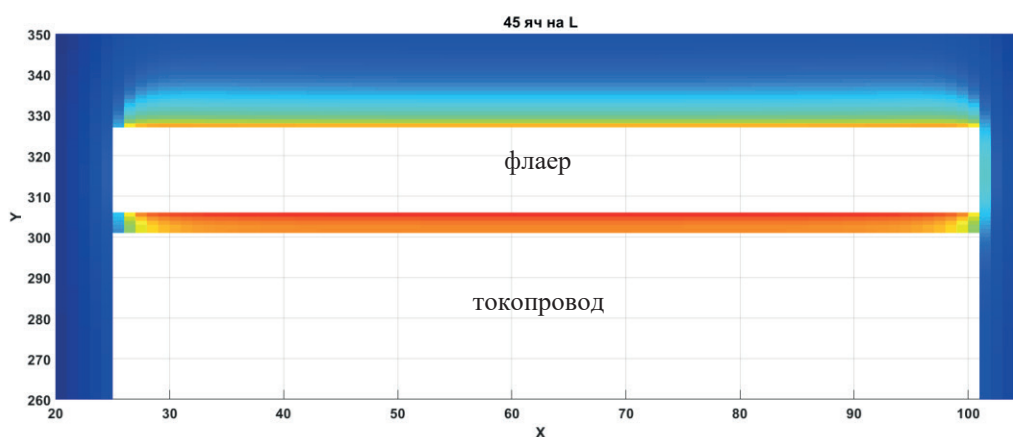


Рис.8. Распределение модуля напряженности магнитного поля в центральном сечении  $XY$ . 45 ячеек  $dl$  при  $L = 0,5$  мм

2. Общая толщина  $L$  – переменная,  $dl = const$ .

Далее будет продемонстрировано, как изменяется распределение модуля напряженности магнитного поля при увеличении количества слоев.

На рисунках 9–11 приведены профили модуля напряженности магнитного поля при увеличении слоев (толщина  $dl = 0.5$  мм). Как видно из рисунков 9–11, в зазоре «флаер–ОТ» профиль  $H$  скругляется, а за внешней стороной флаера выгибается в обратную сторону.

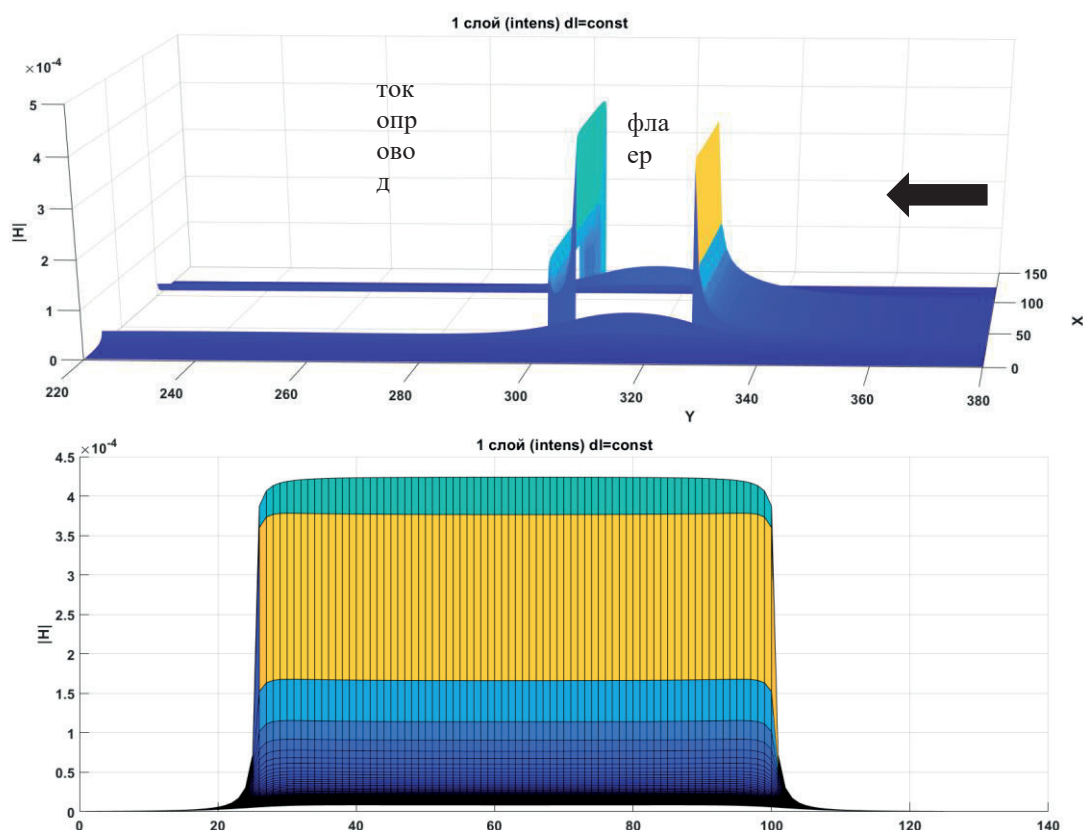


Рис.9. Распределение модуля напряженности магнитного поля. 1 слой  $dl$ .

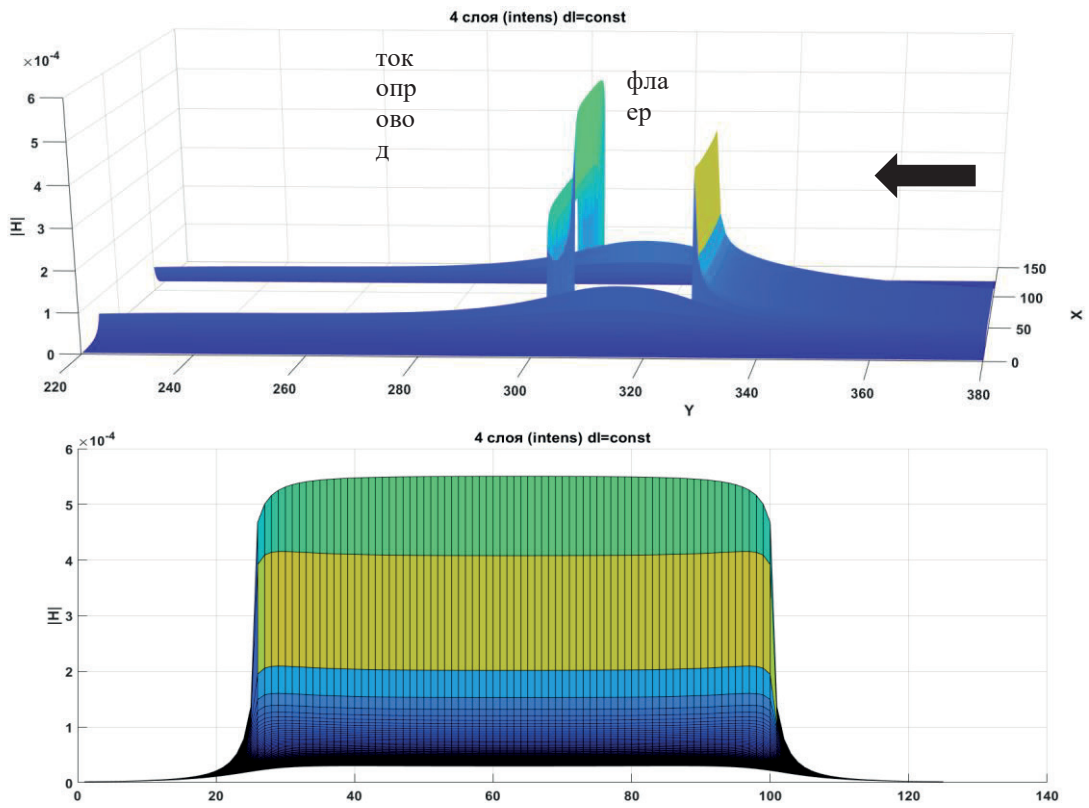


Рис.10. Распределение модуля напряженности магнитного поля. 4 слоя  $dl$ .

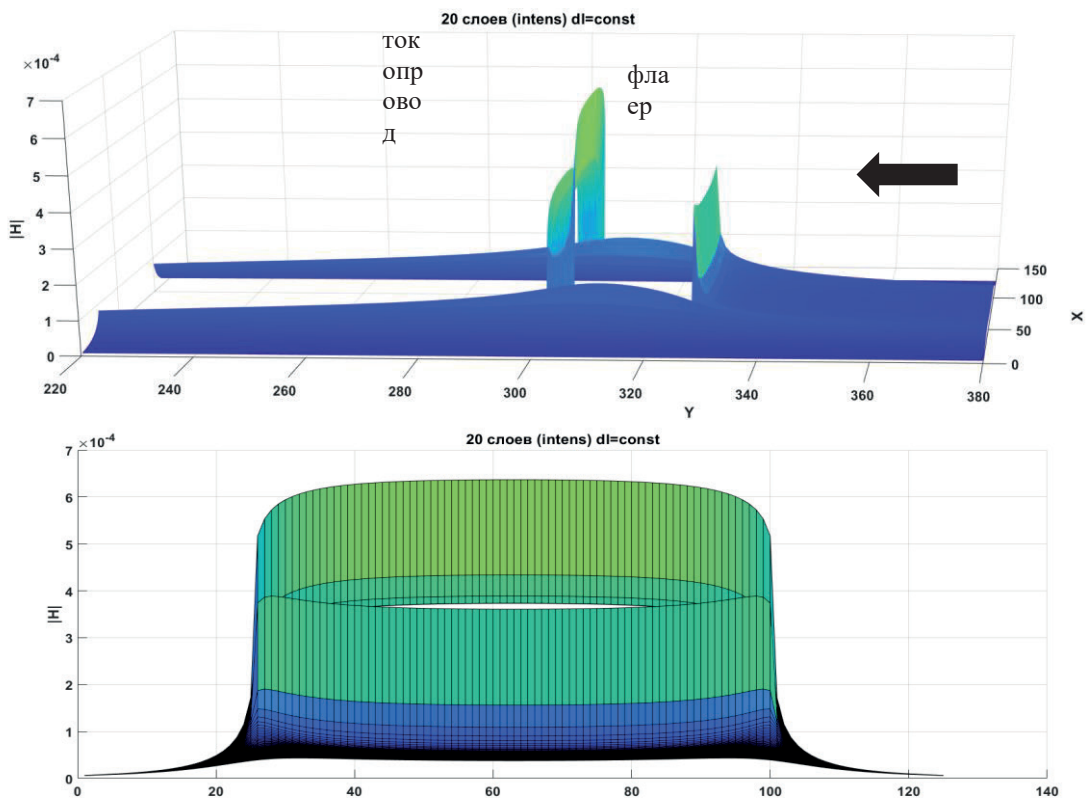


Рис.11. Распределение модуля напряженности магнитного поля. 5 слоев  $dl$ .

Возможность численно производить расчет по толщине позволяет перейти к определению сил на единицу площади, действующих на флаер со стороны обратного токопровода, и оптимизировать размеры флаера для максимизации этой силы.

### **Заключение**

Для различных геометрических конфигураций «флаер – обратный токопровод» по закону Био-Савара-Лапласа рассчитаны распределения магнитного поля.

Полученные результаты (по известному полю) позволяют более точно оценить распределение тока в системе.

Для двумерной задачи из полученных результатов следует:

1. Изменение (смещение к поверхности – границе зазора) плотности тока  $j$ , протекающего в обратном токопроводе, приводит к увеличению продольного поля вдоль оси  $X$  ( $H_x$  в зазоре).
2. С уменьшением ширины обратного токопровода (вплоть до размеров флаера) распределение магнитного поля в зазоре и тока во флаере становятся более однородным.
3. Обратный токопровод необходимо изготавливать из меди (в настоящее время изготавливается из стали). При использовании стали необходимо использовать немагнитную сталь (магнитная проницаемость  $\mu_{Fe} > \mu_{Cu}$ , удельное сопротивление  $\rho_{Fe} > \rho_{Cu}$ ).

Для трехмерной задачи из полученных результатов следует, что расчетные ячейки, удаленные от сечения, в котором выполняются расчеты распределения магнитного поля, оказывают существенное влияние на распределение поля в зазоре и за флаером.

### **Список литературы:**

1. Григорьев А.Н., Борщевский М.А., Матвеев И.В., Лубенченко Н.А., Электротехнический расчет токораспределения при электрическом взрыве фольги / Труды Харитоновские научные чтения-2023.
2. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Лубенченко Н.А., Инженерная модель для оценки скорости флаера в сильноточных установках / Труды Забабахинские научные чтения-2023.
3. Прокофьев Д.Д., Распределение магнитного поля, созданного током, протекающим по пластине, находящейся в сверхпроводящем состоянии // ЖТФ, т. 76, вып. 6, 2006
4. Джексон Дж., Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – 4-е изд. – М.: Физматлит, 2005.

## ГЕНЕРАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНЫХ СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*Минаев Александр Сергеевич*

*Снежинский физико-технический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Челябинская обл., г. Снежинск*

*[ASMinaev95@yandex.ru](mailto:ASMinaev95@yandex.ru)*

## RADAR IMAGE GENERATION USING GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS

*Alexander Minaev*

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

### **Аннотация.**

В данной работе рассматривается использование генеративно-состязательных сетей (GAN) для синтеза радиолокационных изображений из оптических данных. Исследование выделяет потенциал архитектур с использованием временного сдвига в сравнении с традиционными методами.

### **Abstract.**

This study explores the use of generative adversarial networks (GANs) for synthesizing radar images from optical data. The research highlights the potential of architectures utilizing temporal shifts in comparison to traditional methods.

***Ключевые слова:** Генеративно-состязательные сети; синтезированные данные; радиолокационные изображения.*

**Keywords:** *Generative adversarial networks; synthesized data; radar images.*

Традиционный сбор радиолокационных данных требует значительных затрат, включая использование специализированных радиолокационных систем и космических платформ. Генеративно-состязательные сети (GAN) предлагают инновационное решение, позволяя синтезировать радиолокационные изображения из более доступных оптических данных. Синтезированные изображения могут дополнить или заменить реальные данные в условиях их недоступности, делая технологию доступнее для исследовательских групп. GAN

могут адаптировать оптические данные к характеристикам радиолокационных данных, что позволяет создавать необходимые ресурсы для анализа и принятия решений в таких областях, как градостроительное планирование и мониторинг окружающей среды.

Для исследования был разработан полуавтоматический процесс с использованием API Google Earth Engine для извлечения парного набора данных Sentinel-1 и Sentinel-2 за 2021 и 2023 годы 46 городских районов со всего мира с приемлемым уровнем облачности. Процесс рекурсивно двигает дату на один месяц, пока не будут найдены данные с наименьшей облачностью, либо медиана коллекции данных в зависимости от количества данных. Данные Sentinel-1 отражали поляризацию VV, а данные Sentinel-2 включали диапазоны RGB, NIR в пространственном разрешении 10 м, а также диапазоны SWIR-1 и SWIR-2 на расстоянии 20 м. Данные были случайным образом разделены на обучающую и тестовую выборки, при этом для тестовой выборки было выделено 30% данных. Полученные изображения были разделены на патчи размером 256x256 пикселей, что позволило обеспечить однородность входных данных для обучения моделей, а также увеличить количество обучающих примеров, что важно для достижения высокой точности.

GAN состоят из двух ключевых элементов:

- генератор, который производит изображения, имитируя реальные радиолокационные данные. Он использует методы глубокого обучения, особенно свёрточные нейронные сети (СНС) или архитектуры, подобные U-Net [3];

- дискриминатор, который оценивает, являются ли изображения реальными или синтезированными. Эта компонента также базируется на СНС для выполнения задач классификации.

Обучение GAN похоже на минимаксную игру, где генератор стремится максимизировать вероятность того, что дискриминатор ошибочно классифицирует синтезированные изображения как настоящие. Дискриминатор стремится минимизировать эту вероятность, правильно идентифицируя настоящие и синтезированные изображения. Эффективность обучения зависит от правильного баланса между способностями генератора и дискриминатора, а также от использования техник, таких как dropout и batch normalization, для предотвращения переобучения и улучшения обобщающей способности модели.

Переходя к практическому применению GAN, особое внимание было уделено модели Pix2Pix [1], которая применяет условные GAN (cGAN) для задачи преобразования изображений. Генератор в Pix2Pix, построенный на основе архитектуры U-Net, обеспечивает эффективное соединение между входными и выходными данными через пропускающие соединения, которые помогают сохранять детальность изображения. Дискриминатор в модели, известный как PatchGAN, оценивает не всё изображение целиком, а отдельные его части (патчи), это позволяет ему более детально анализировать текстуры и края. В дополнение к Pix2Pix, была рассмотрена модель TemporalGAN (TSGAN) [2], предназначенная для работы с временными последовательностями данных.



Основная особенность TSGAN заключается в использовании двух входных потоков данных (для времени  $T_1$  и  $T_2$ ), что позволяет модели обрабатывать и анализировать изменения между этими временными точками. Генератор в TSGAN строится таким образом, чтобы не только создавать синтетические изображения, но и акцентировать внимание на областях, где наблюдаются изменения, что достигается за счет введения модулей внимания.

Анализ показателей качества изображений (пиковое отношение сигнала к мощности шума (PSNR), индекс структурного сходства (SSIM), а также среднее взвешенное SSIM (WSSIM) и среднее взвешенное PSNR, которые учитывают важность различных областей изображений) свидетельствует о высокой эффективности модели в сохранении контекста исходных данных и минимизации артефактов. В то время как Pix2Pix показал значительно ниже результаты, что указывает на его склонность к вымышленным модификациям всех данных, что представлено на рисунке 1.

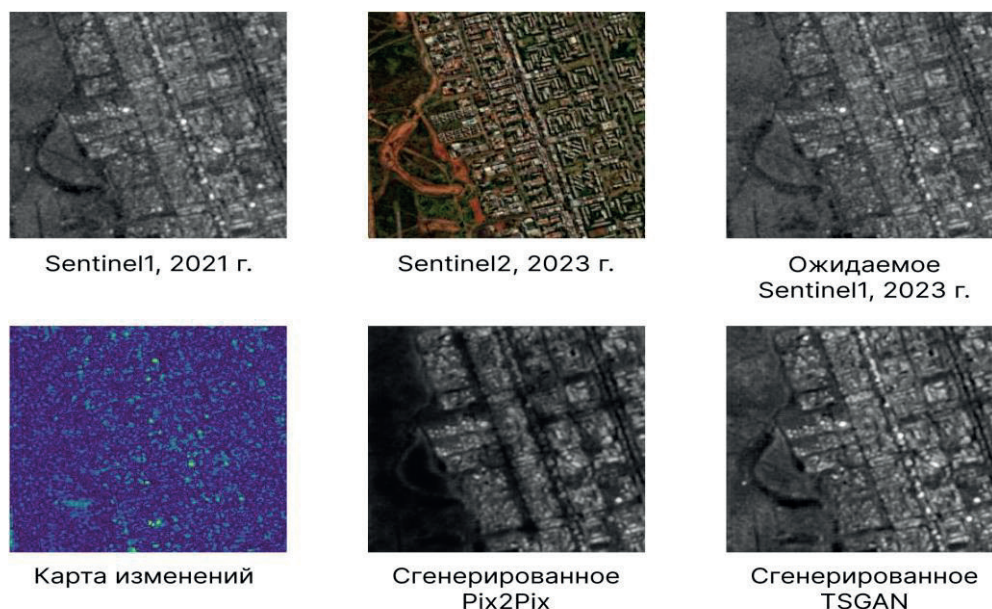


Рис. 1. Сравнение архитектуры с временным сдвигом и Pix2Pix

### Список литературы:

1. Isola P. et al. Image-to-image translation with conditional adversarial networks //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2017. – С. 1125-1134.
2. Rangzan M. et al. TSGAN: An Optical-to-SAR Dual Conditional GAN for Optical based SAR Temporal Shifting //arXiv preprint arXiv:2401.00440. – 2023.
3. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation //Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III 18. – Springer International Publishing, 2015. – С. 234-241.

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛУЧШЕННОГО АЛГОРИТМА SWINGING DOOR В СЕНСОРНОЙ СЕТИ УМНОГО ГОРОДА

*Михайлов Александр Федорович*

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», РФ, г. Снежинск*

*[chelaxe@gmail.com](mailto:chelaxe@gmail.com)*

## APPLICATION OF IMPROVED SWINGING DOOR ALGORITHM IN SENSOR NETWORK OF SMART CITY

*Aleksandr Fedorovich Mikhaylov*

*Snezhinsk Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University  
MEPhI, Russia, Snezhinsk.*

### **Аннотация.**

В данной работе рассматривается применение усовершенствованного алгоритма Swinging Door для сжатия данных в сенсорных сетях умного города, что обеспечивает оптимизацию передачи данных. Аппаратная реализация алгоритма способствует ускорению обработки информации. Проведенные эксперименты подтверждают высокую эффективность данного подхода, значительное снижение объема передаваемых данных и энергопотребления устройств, что критично для стабильности сенсорных сетей умного города.

### **Abstract.**

This paper discusses the application of an advanced Swinging Door algorithm for data compression in smart city sensor networks, which provides optimization of data transmission. The hardware implementation of the algorithm contributes to the acceleration of information processing. The conducted experiments confirm the high efficiency of this approach, significant reduction in the volume of transmitted data and power consumption of devices, which is critical for the stability of sensor networks of smart city.

**Ключевые слова:** *swinging door; сжатие данных; мониторинг; алгоритм; репрезентативность.*

**Keywords:** *swinging door; data compression; monitoring; algorithm; representativeness.*



Сенсорные сети умного города, интегрирующие множество датчиков, собирают обширные данные для управления городскими процессами. С ростом числа датчиков увеличивается и объем информации, требующей эффективной обработки и передачи, что нагружает сетевую инфраструктуру. Сжатие данных обеспечивает сокращение их объема при сохранении качества, снижая тем самым нагрузку на сеть и облегчая хранение. Адаптация алгоритмов сжатия к специфике сенсорных сетей, включая ограниченное энергопотребление и необходимость быстрого отклика, является важной задачей для развития устойчивой инфраструктуры умных городов. [1, с. 62]

Усовершенствованный алгоритм *Swinging Door* [2, с. 222] значительно повышает эффективность сжатия данных в сенсорных сетях умного города, оптимизируя передачу информации и сокращая энергопотребление устройств без потери данных. Его адаптация к динамическим временным рядам улучшает обработку и обмен данными, способствуя более эффективному мониторингу и управлению городской инфраструктурой.

В рамках исследования была проведена работа по воплощению алгоритма сжатия данных на аппаратном уровне. Для демонстрации этого процесса был выбран 8-битный микроконтроллер AVR серии ATmega328. Этот выбор был сделан с целью показать, что даже устройства с относительно невысокими вычислительными ресурсами способны эффективно справляться с задачей реализации предложенного алгоритма.

Для наглядности и тестирования алгоритма была разработана схема температурного сенсора, которая представлена на Рис. 1. Принципиальная схема температурного сенсора. Данная схема включает в себя не только сам микроконтроллер, но и дополнительные компоненты, необходимые для сбора и обработки температурных данных. Затем, основываясь на разработанной схеме, был изготовлен прототип на печатной плате. Процесс изготовления и внешний вид печатной платы демонстрируются на Рис. 2. Печатная плата температурного сенсора, и он сам. Это позволило провести практические испытания алгоритма в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным сценариям сенсорных сетей умного города.

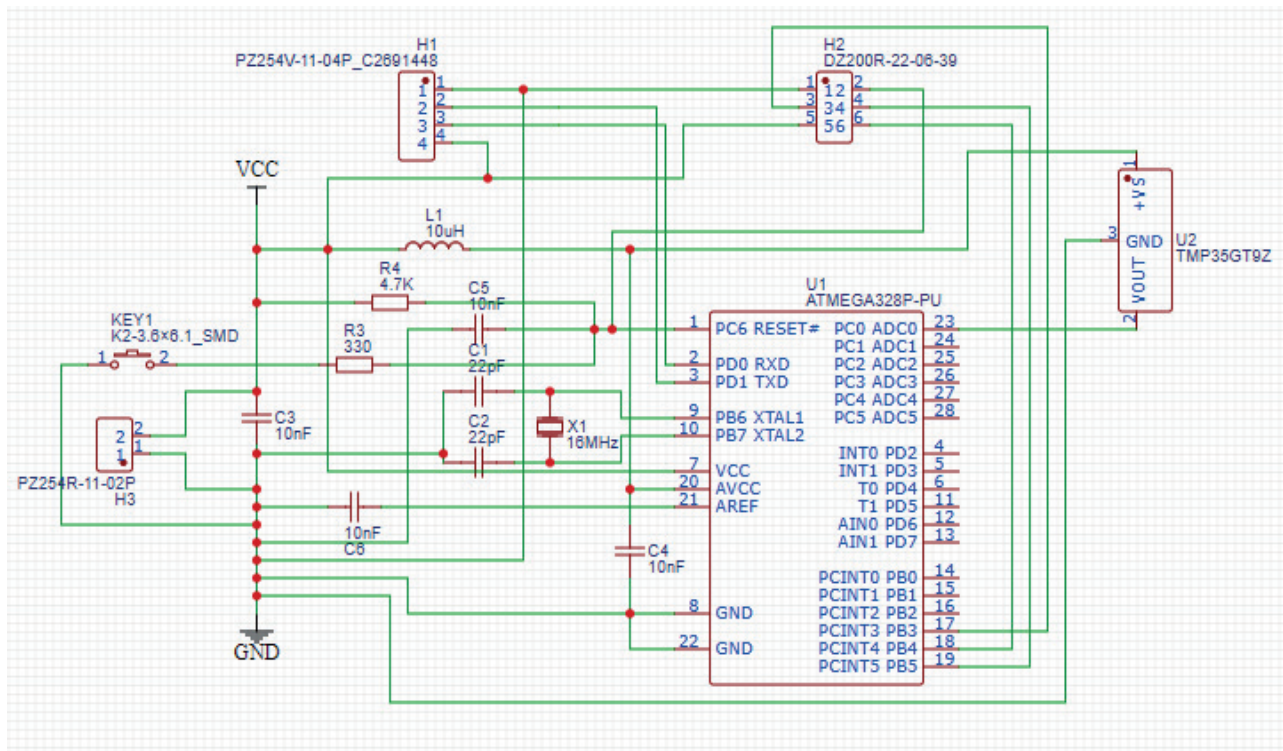


Рис. 1. Принципиальная схема температурного сенсора

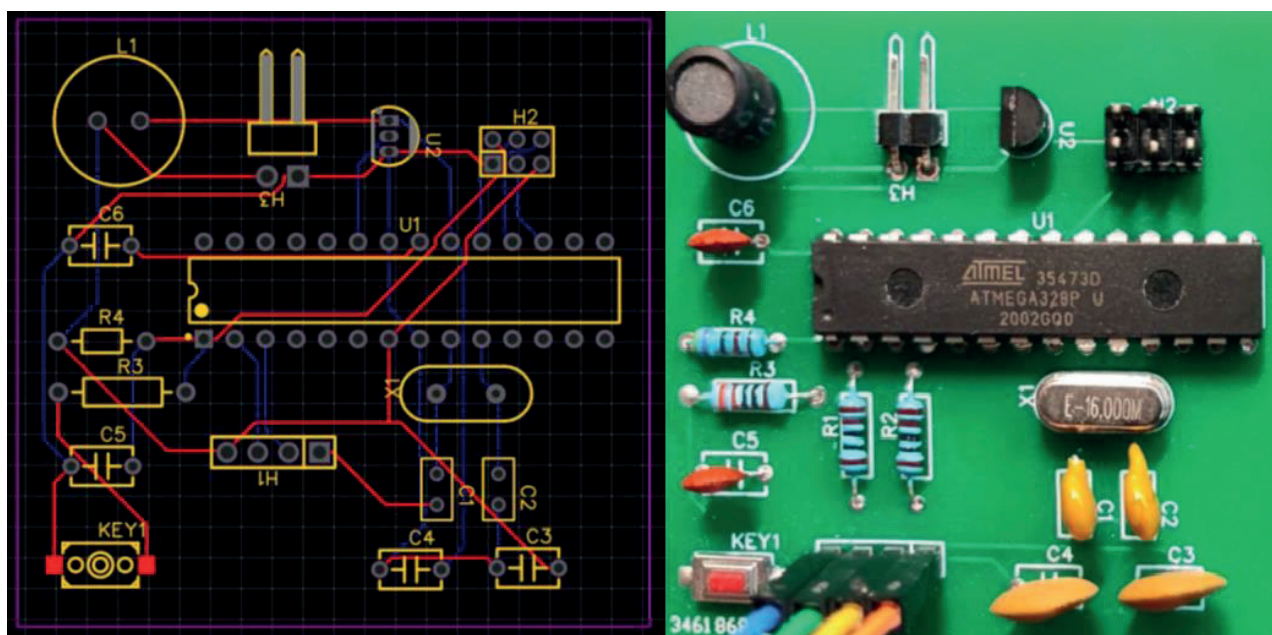


Рис. 2. Печатная плата температурного сенсора, и он сам

Для автономной настройки погрешности сжатия использовалась экспоненциальное скользящее среднее (EMA - exponential moving average) (1).

(1)

$$f_{ema} = a \times s^i(d, p) + (1 - a) \times CD,$$

где  $a[0, 1]$  сглаживающая константа (smoothing constant) характеризующая скорость уменьшения весов,  $s^i(d, p) = \left| \frac{dy - py}{dx - px} \right|$  абсолютное значение наклона между последовательными точками,  $CD$  погрешность сжатия (compression deviation).

Для оценки эффективности сжатия данных использовались метрики: ошибка сжатия ( $CE$ ) и степень сжатия ( $CR$ ).

Ошибка сжатия ( $CE$ ) измеряет относительное количество ошибок, наблюдаемых после сжатия ((2)). Она рассчитывается как сумма разностей между несжатыми данными ( $T_i$ ) и результатами сжатых данных после процесса декомпрессии ( $T'_i$ ), деленная на сумму абсолютных значений несжатых данных.

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - T'_i|}{\sum_{i=1}^n |T_i|} \quad (2)$$

Степень сжатия ( $CR$ ) направлена на оценку эффективности процесса сжатия ((3)) и представляет собой уменьшение количества образцов, достигнутое с помощью алгоритма сжатия. Она рассчитывается как дополнение к делению сжатых ( $CompressedSamples$ ) образцов на несжатые ( $UncompressedSamples$ ).

$$CR = 1 - \frac{CompressedSamples}{UncompressedSamples}, \quad (3)$$

Важно отметить, что эти метрики должны использоваться вместе, чтобы правильно представить производительность алгоритма. Поэтому предлагается новая метрика, называемая критерием сжатия ( $CC$ ) ((4)).

$$CC(CE, CR) = \frac{2 \times CR \times (1 - CE)}{CR + (1 - CE)} \quad (4)$$

В этой метрике используется среднее гармоническое значение двух основных метрик, поскольку она более чувствительна, когда одно значение намного меньше другого. Эта метрика отражает эффективность сжатия. Набор допустимых значений  $CC$  принадлежит диапазону  $[0, 1]$ , где хорошее сжатие имеет значение, близкое к 1, что соответствует высоким значениям  $CR$  и низким  $CE$  [3, с. 3].

В течение последних трех лет проводился мониторинг температуры окружающей среды, результаты которого отображены на Рис. 3. Данные мониторинга температуры окружающей среды. Анализ собранных данных позволил выявить следующие характеристики: погрешность сжатия составила 0.06, коэффициент сжатия - 0.84, а качество сжатия оценивается в 0.89. Полученные метрики подтверждают эффективность метода сжатия данных при одновременном сохранении их репрезентативности.

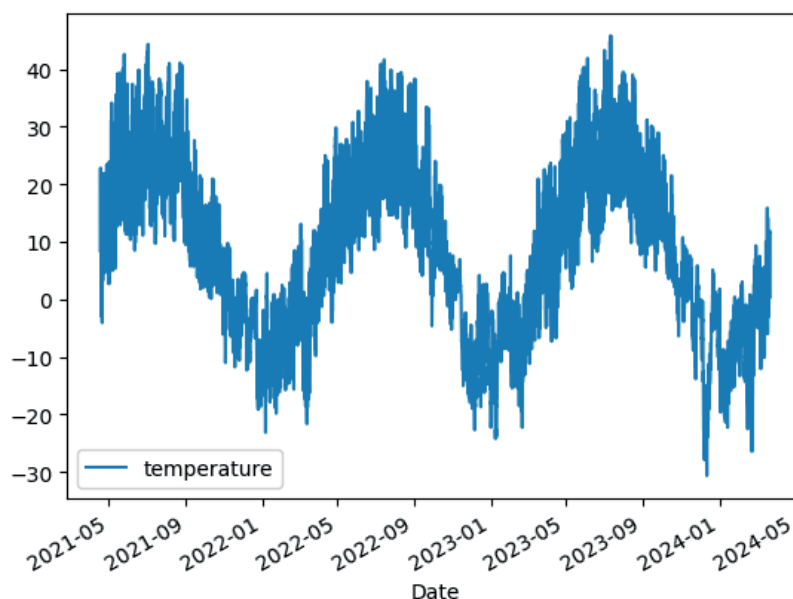


Рис. 3. Данные мониторинга температуры окружающей среды

На Рис. 4. Графики изменения значения наклона между последовательными точками и экспоненциальное скользящее среднее представлены графики абсолютного значения наклона между последовательными точками и экспоненциальное скользящее среднее которые позволяют автономно настраивать погрешности сжатия алгоритма.

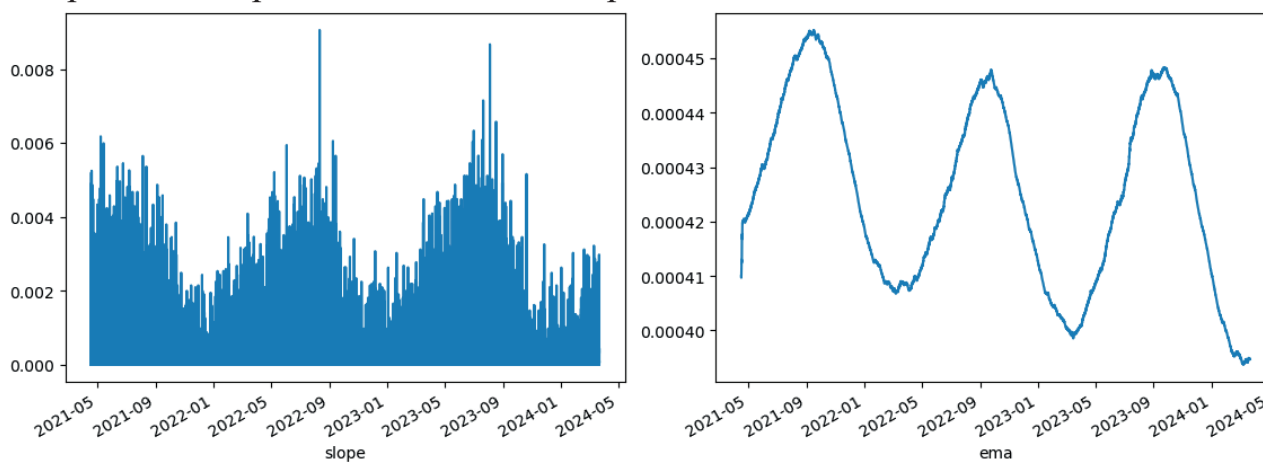


Рис. 4. Графики изменения значения наклона между последовательными точками и экспоненциальное скользящее среднее

Результаты исследования открывают путь для дальнейшего развития и внедрения эффективных методов сжатия данных в сенсорных сетях, что является важным шагом в сторону повышения устойчивости и экономичности систем умного города.

#### Список литературы:

1. Ильина И. Н. Трансформация подходов к развитию «умного города» / И. Н. Ильина, М. Коно. Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, 2023. 248 с.

2. Михайлов А.Ф. Разработка метода сжатия данных мониторинга с сохранением репрезентативности [электронный ресурс]. Режим доступа. URL: [https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2024/04/tezisy\\_2024.pdf](https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2024/04/tezisy_2024.pdf) (дата обращения: 25.04.2024).
3. Juan David Arias Correa, Alex Sandro Roschildt Pinto, Carlos Montez, Erico Meneses Leão. Swinging Door Trending Compression Algorithm for IoT Environments [электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/fe00/bc1bbea2147c338898a8fa6c31a84afce467.pdf> (дата обращения: 25.04.2024).



**РАСЧЕТ СМЕШАННЫХ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ  
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ  
В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ SINARA**

**Мустафин А.М.<sup>1,2</sup>, Лебедев С.Н.<sup>1,2</sup>**

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

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.  
[mustafinam@vniitf.ru](mailto:mustafinam@vniitf.ru)

**THERMOMECHANICAL-EQUILIBRIUM-BASED SIMULATION OF  
MIXED CELLS IN THE SINARA CODE**

**A.M. Mustafin<sup>1,2</sup>, S.N. Lebedev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Zababakhin RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk Region*

<sup>2</sup>*MEPI National Nuclear Research University's Snezhinsk Physicotechnical  
Institute, Chelyabinsk Region*  
[mustafinam@vniitf.ru](mailto:mustafinam@vniitf.ru)

В рамках двумерного пакета программ SINARA для расчета смесей в областях, в которых учитывается турбулентное перемешивание, реализована новая неявная схема расчета газодинамики на основе модели термомеханического равновесия. В работе представлено описание реализованной разностной схемы.

*Ключевые слова: математическое моделирование, численные методы решения уравнений, газовая динамика, диффузионная модель перемешивания, модель термомеханического равновесия.*

A new implicit finite-difference scheme for gasdynamics calculations on the basis of the thermomechanical equilibrium model is implemented in the 2D SINARA code for the simulation of mixtures in the regions where turbulent mixing is considered. The paper gives a description of the scheme.

*Keywords: mathematical modeling, numerical equation solution methods, gasdynamics, diffusion model of mixing, thermomechanical equilibrium model*

## Введение

В процессе расчета сложных газодинамических процессов возникают ситуации, когда контактные границы становятся неустойчивыми в смысле Релея-Тейлора [1], Рихтмайера-Мешкова [2, 3] или Кельвина-Гельмгольца [4]. Это может приводить к разрушению этих границ и формированию зон турбулентности. Для описания динамики турбулентных зон в двумерном пакете программ SINARA реализованы диффузионные модели перемешивания. В зонах турбулентности образуются смеси веществ и газодинамические расчеты должны учитывать особенности компонент данной смеси.

При решении уравнений газодинамики возможно использование двух подходов при расчете многокомпонентных течений. Первый использует модель парциальных составляющих, в которой все вещества смеси имеют средние характеристики, в  $(\rho, T)$  переменных – среднюю плотность и среднюю температуру, а давление среды определяется усреднением давлений веществ смеси по массовым концентрациям  $P = \sum_k c_k P_k(\rho, T)$ . Во втором подходе при определении средних параметров среды используются индивидуальные термодинамические характеристики веществ смеси  $(\rho_k, \varepsilon_k, T_k)$ , при этом вводятся некоторые дополнительные замыкающие соотношения. Для этого могут использоваться модель «равной сжимаемости», модель на основе принципа локального равенства давлений компонент смеси, а также равенства приращений давления.

В расчетах с моделями турбулентности в пакете SINARA использовалась модель парциальных составляющих. Данная работа посвящена внедрению новой модели в программный пакет. Представлена разностная схема решения

уравнений газодинамики в многокомпонентных средах с моделью термомеханического равновесия.

### Постановка задачи

В многокомпонентных средах решается система уравнений газодинамики в лагранжевых переменных

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \nu}{\partial t} = \nu \operatorname{div}(\vec{u}), \\ \frac{\partial \nu_k}{\partial t} = \nu_k \operatorname{div}(\vec{u}_k), \quad k = \overline{1, K}, \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nu \operatorname{grad}(P), \\ \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} = -P_k \nu_k \operatorname{div}(\vec{u}_k), \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -P \cdot \nu \operatorname{div}(\vec{u}) - \nu \operatorname{div}(\vec{q}) - \nu \operatorname{div}(\vec{S}_t), \\ \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = \vec{u}, \\ \frac{dc_k}{dt} = \nu \cdot \operatorname{div}(\mu_i \cdot \vec{\nabla} c_k) \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\nu = 1/\rho$  - удельный объем,  $k$  - номер вещества в смеси,  $K$  - количество компонент смеси,  $\varepsilon = \varepsilon(T, \nu)$  - средняя удельная внутренняя энергия,  $\varepsilon_k = \varepsilon_k(T, \nu_k)$  - удельная внутренняя энергия  $k$ -ой компоненты смеси,  $\nu_k$  - удельный объем  $k$ -ой компоненты смеси,  $P = P(T, \nu)$  - давление,  $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r}, t)$  - скорость,  $\vec{r} = (r, z)$  - радиус-вектор лагранжевой точки,  $\mu_i$  - турбулентная динамическая вязкость,  $c_k$  - массовая концентрация  $k$ -ой компоненты смеси,  $\vec{q}$  - тепловой поток,  $\vec{S}_t$  - турбулентный тепловой поток. Переменные без индекса относятся к средним величинам.

В систему (1) входят уравнения неразрывности и энергии для каждой компоненты смеси. Неизвестными величинами данной системы являются:  $\vec{r}$ ,  $\vec{u}$ ,  $\vec{u}_k$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_k$ ,  $\nu$ ,  $\nu_k$ ,  $P$ ,  $P_k$ ,  $T_k$ ,  $T$ .

При построении модели будем исходить из модели локального термодинамического равновесия, полагая, что давления и температуры в



пределах одной ячейки одинаковы для всех имеющихся в ней веществ. Для замыкания системы (1) используются уравнения

$$\begin{aligned} P &= P_1(\rho_1, T_1) = P_2(\rho_2, T_2) = \dots = P_K(\rho_K, T_K), \\ T &= T_1 = T_2 = \dots = T_K. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда можно отдельно записать систему уравнений

$$\begin{cases} P(\rho, T) = P_k(\rho_k, T) = P_j(\rho_j, T), & k = \overline{1, K}, j = \overline{1, K}, \\ \frac{1}{\rho} = \sum \frac{c_k}{\rho_k}, \\ \varepsilon = \sum c_k \varepsilon_k(\rho_k, T). \end{cases} \quad (3)$$

Неизвестными в (3) являются средняя температура и плотности компонент смеси. Плотность каждой компоненты определяется выражением

$$\rho_k = \frac{c_k}{\alpha_k} \rho, \quad (4)$$

где  $c_k = m_k/m$  – массовая концентрация  $k$ -го компонента вещества,  $\alpha_k = V_k/V$  – объемная концентрация  $k$ -го компонента вещества.

Таким образом необходимо решить совместно две системы уравнений: систему (3) и газодинамическую систему

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = \nu \operatorname{div}(\vec{u}), \\ \frac{\partial v_k}{\partial t} = \nu_k \operatorname{div}(\vec{u}_k), & k = \overline{1, K}, \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nu \operatorname{grad}(g), \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -g\nu \operatorname{div}(\vec{u}) - \nu \operatorname{div}(\vec{q}) - \nu \operatorname{div}(\vec{S}_i), \\ \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = \vec{u}, \\ \frac{dc_k}{dt} = \nu \cdot \operatorname{div}(\mu_i \cdot \vec{\nabla} c_k), \end{cases} \quad (5)$$

где отсутствуют уравнения энергии для компонент вещества, а переменная давления заменена на функцию вязкого давления  $g(\rho, T) = P^{VPC}(\rho, T) + \omega(\rho, T)$ .

### Разностная схема

Рассматриваемая система газодинамических уравнений (5) решается численно при помощи конечно-разностного подхода. Для получения разностных уравнений в рассматриваемой области  $D$  на плоскости  $r, z$  строится четырехугольная регулярная пространственная сетка. Система уравнений (5) аппроксимируется по времени схемой с весами. Дифференциальные операторы дивергенции и градиента заменяются разностными аналогами  $DIV$  и  $GRAD$ . Получаем систему дифференциально-разностных уравнений

$$\begin{cases} v^{n+1} - v^n = \tau v^{n+1} DIV(\bar{u})^{(0.5)} \\ v_k^{n+1} - v_k^n = \tau v_k^{n+1} DIV(\bar{u}_k)^{(0.5)}, \quad k = \overline{1, K}, \\ \bar{u}^{n+1} - \bar{u}^n = -\tau v^{n+1} GRAD(g)^{(\sigma)}, \\ \varepsilon^{n+1} - \varepsilon^n = -\tau g^{(\sigma)} v^{n+1} DIV(\bar{u})^{(0.5)}, \\ \bar{r}^{n+1} - \bar{r}^n = \tau \bar{u}^{(0.5)}, \\ g^{n+1} = P^{n+1} + \omega^{n+1}, \\ g = g_1 = g_2 = \dots = g_K, \\ T = T_1 = T_2 = \dots = T_K, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\sigma$  – весовой параметр схемы.

Система (6) разрешается явным образом, если известна функция давления. При  $\sigma > 0$  следует получить уравнение для определения давления  $g^{(\sigma)}$ . Для этого линеаризуем исходную систему (6). В результате получим дифференциально-разностное уравнение в потоковой форме для нахождения вязкого давления вида:

$$\begin{cases} g^{(\sigma)v+1} + \Psi_1^v DIV(\vec{W}^{v+1}) + \Psi_0^v DIV(\vec{W}_0^{v+1}) = \Phi^v, \\ \vec{W}^{v+1} + \tau v^{n+1} GRAD(g^{(\sigma)v+1}) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где коэффициенты

$$\Psi_1^v = \sigma \frac{\tau}{2 \sum_{k=1}^K \kappa_k \zeta_k} \min(-P_{v_k}) v^v \left( 1 - \sum_{k=1}^K \frac{c_k}{P_{v_k}} \frac{P_T}{\varepsilon_T} (g^{(\sigma)} + \varepsilon_v) \right),$$

$$\Psi_0^v = -\sigma \left( \sum_{k=1}^K \kappa_k \frac{\partial \omega}{\partial B_0} / \sum_{k=1}^K \kappa_k \zeta_k \right),$$

$$\Phi^v = g^{(\sigma)v} + \Psi_1^v DIV(\vec{W}^v) + \Psi_0^v DIV(\vec{W}_0^v) + \sigma \frac{\sum_{k=1}^K \kappa_k (F_0)_k^v}{\sum_{k=1}^K \kappa_k \zeta_k},$$

$$\kappa_k = (c_k \min(-P_{v_k})) / P_{v_k},$$

$$(F_0)_k^v = \frac{P_T}{\varepsilon_T} (g^{(\sigma)} + \varepsilon_v) f_v^v - \frac{P_T^v}{\varepsilon_T^v} f_\varepsilon^v - P_{v_k} f_{v_k}^v - f_g^v,$$

$$\zeta_k = 1 + \tau \sigma (v B^{(0.5)})^v (P_T^v / \varepsilon_T^v),$$

$$B = \text{div} \vec{u},$$

$$f_\varepsilon^v = \varepsilon^v - \varepsilon^n + (v^v - v^n) g^{(\sigma)v},$$

$$f_g^v = g^v - P^v - \omega^v,$$

$$f_v^v = v^v - v^n - \tau v^v B^{(0.5)v},$$

$$f_{v_k}^v = v_k^v - v_k^n - \tau v_k^v B_k^{(0.5)v}, \quad k = \overline{1, K}.$$

Для решения уравнения (7) используется подход метода «Ромб» [5], [6]. Уравнения полученной системы интегрируются по одной ячейке разностной сетки. Вводятся нормальные составляющие вектора ускорения на ребрах ячейки.

$$(W_\xi)_i = W_{\xi 1} = \vec{W} \cdot \vec{n}_1, \quad (W_\eta)_{j+1} = W_{\eta 2} = \vec{W} \cdot \vec{n}_2, \quad (W_\xi)_{i+1} = W_{\xi 3} = \vec{W} \cdot \vec{n}_3, \quad (W_\eta)_j = W_{\eta 4} = \vec{W} \cdot \vec{n}_4,$$

а также нормальные компоненты вектора  $\vec{W}$  в центре ячейки  $W_\xi, W_\eta$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} g^{v+1} + \frac{\Psi_0}{\Delta V} ((RW_\eta)_2 - (RW_\eta)_4 + (RW_\xi)_3 - (RW_\xi)_1)^{v+1} + \\ \frac{\Psi_1}{\Delta S} ((W_\eta)_2 - (W_\eta)_4 + (W_\xi)_3 - (W_\xi)_1)^{v+1} = F_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}^v, \\ \vec{W}_\xi^{v+1} + \frac{\tau v^v}{\Delta S} \alpha_1 (g_3 - g_1)^{v+1} - \frac{\tau v^v}{\Delta S} \beta_1 (g_2 - g_4)^{v+1} = 0, \\ \vec{W}_\eta^{v+1} + \frac{\tau v^v}{\Delta S} \alpha_2 (g_2 - g_4)^{v+1} - \frac{\tau v^v}{\Delta S} \beta_2 (g_3 - g_1)^{v+1} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Здесь  $\Delta S$  – площадь ячейки,  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  – метрические параметры,

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= (\Delta_j r)_{i+\frac{1}{2}}^2 + (\Delta_j z)_{i+\frac{1}{2}}^2, \\ \alpha_2 &= (\Delta_i r)_{j+\frac{1}{2}}^2 + (\Delta_i z)_{j+\frac{1}{2}}^2, \\ \beta_1 &= \beta_2 = \Delta_i r_{j+\frac{1}{2}} \Delta_j r_{i+\frac{1}{2}} + \Delta_j z_{i+\frac{1}{2}} \Delta_i z_{j+\frac{1}{2}}, \\ \Delta_i(\cdot) &= (\cdot)_{i+1} - (\cdot)_i.\end{aligned}$$

Нижние индексы у величин, относящиеся к центру ячейки, опущены.

Система уравнений (8) решается прогонкой с использованием метода стабилизирующей поправки [7]. На первом этапе решается одномерная система

$$\begin{cases} g^{v+1/2} + \frac{\Psi_0}{\Delta V} (\Delta_i R W_\xi^{v+1/2}) + \frac{\Psi_1}{\Delta S} (\Delta_i W_\xi^{v+1/2}) = F^v + \frac{\Psi_0}{\Delta V} (\Delta_j R W_\eta^v) + \frac{\Psi_1}{\Delta S} (\Delta_j W_\eta^v), \\ W_\xi^{v+1/2} + \frac{\tau v}{\Delta S} \alpha_1 \Delta_i g^{v+1/2} = \frac{\tau v}{\Delta S} \beta_1 \Delta_j g^v. \end{cases} \quad (9)$$

На втором этапе решается одномерная система

$$\begin{cases} g^{v+1/2} + \frac{\Psi_0}{\Delta V} (\Delta_j R W_\eta^{v+1/2}) + \frac{\Psi_1}{\Delta S} (\Delta_j W_\eta^{v+1/2}) = F^v + \frac{\Psi_0}{\Delta V} (\Delta_i R W_\xi^{v+1/2}) + \frac{\Psi_1}{\Delta S} (\Delta_i W_\xi^{v+1/2}), \\ W_\eta^{v+1/2} + \frac{\tau v}{\Delta S} \alpha_2 \Delta_j g^{v+1/2} = \frac{\tau v}{\Delta S} \beta_2 \Delta_i g^{v+1/2}. \end{cases} \quad (10)$$

Суть метода «Ромб» состоит в привлечении дополнительных соотношений для замыкания одномерных систем уравнений. Для системы (9) эти соотношения берутся в виде

$$\begin{aligned}g &= \frac{g_{i,j+1/2} + g_{i+1,j+1/2}}{2} + \delta_{i+\frac{1}{2},j+1/2} \Delta_i W_\xi, \\ W_\xi &= \frac{1}{2} (W_{\xi_{i+1}} + W_{\xi_i}) + \theta_{i+1/2,j+1/2} \Delta_i g.\end{aligned} \quad (11)$$

Для системы (10) соотношения берутся в виде

$$\begin{aligned}g &= \frac{g_{i+1/2,j} + g_{i+1/2,j+1}}{2} + \delta_{i+1/2,j+1/2} \Delta_j W_\eta, \\ W_\eta &= \frac{1}{2} (W_{\eta_{i+1}} + W_{\eta_i}) + \theta_{i+1/2,j+1/2} \Delta_j g.\end{aligned} \quad (12)$$

После подстановки (11) в (9), а (12) в (10) получаются системы линейных двухточечных уравнений вида

$$\begin{cases} g_k + g_{k+1} + c_{k+1/2}^1 \cdot W_k + d_{k+1/2}^1 \cdot W_{k+1} = f_{k+1/2}^1, \\ a_{k+1/2}^2 \cdot g_k + b_{k+1/2}^2 \cdot g_{k+1} + W_k + W_{k+1} = f_{k+1/2}^2, \end{cases} \quad (13)$$

которые решаются одним из вариантов потоковой прогонки [5].

Параметры разностной схемы  $\delta$  и  $\Theta$  могут быть выбраны исходя из различных предположений. После сходимости итераций стабилизирующей поправки получаем функцию вязкого давления  $g^{(\sigma)}$ , используемую далее при решении системы (6).

### Определение плотности компонент смеси

Необходимо также найти плотности компонент смеси и новую среднюю температуру удовлетворяющие системе уравнений (3). Система нелинейная, для её решения вводится итерационный процесс по методу Ньютона. В результате линеаризации взамен исходной системы (3) получаем

$$\begin{aligned} \rho_k^{\mu+1} &= \rho_k^\mu + \left[ \sum_{j=1}^K (P_j - P_k) \frac{c_j}{\rho_j^2} \left( \frac{\partial P_j}{\partial \rho_j} \right)^{-1} + \sum_{j=1}^K \frac{c_j}{\rho_j} - \frac{1}{\bar{\rho}} \right] \cdot \left[ \frac{\partial P_k}{\partial \rho_k} \sum_{j=1}^K \frac{c_j}{\rho_j^2} \left( \frac{\partial P_j}{\partial \rho_j} \right)^{-1} \right]^{-1}, \\ T^{v+1} &= T^v + \frac{\bar{\varepsilon} - \sum c_k \varepsilon_k(\rho_k^{v+1}, T^v)}{\frac{\partial}{\partial T} (\sum c_k \varepsilon_k(\rho_k^{v+1}, T^v))}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь  $P_j(\rho^\mu, T^v)$ ,  $\frac{\partial P_j(\rho^\mu, T^v)}{\partial \rho_j}$ , а  $\rho_j^{v+1} = \rho_j^{\mu+1}$  при выполнении условия сходимости  $\mu$ -итераций.  $|\rho_j^{\mu+1} - \rho_j^\mu| < \varepsilon \rho_j^\mu$ .

### Заключение

В двумерном пакете программ SINARA для описания смесей в областях, в которых решаются уравнения модели турбулентности, была реализована новая неявная схема на основе модели термомеханического равновесия. Получено новое уравнение для определения вязкого давления с учетом плотностей компонент смеси.

### Список литературы:

1. Taylor G.I. “Instability of liquid surfaces when accelerated in direction perpendicular to their planes”. Proceedings of Royal Society of London. Ser.A, 201. 1950.
2. Е.Е. Мешков “Неустойчивость границы двух газов, ускоряемых ударной волной”. Механика жидкостей и газов. №5. 1969.
3. Richtmyer R.D. “Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids”. Communications of Pure and Applied Mathematics. Vol.13. 1960.
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Гидродинамика (теоретическая физика, том VI). Москва. ФИЗМАТЛИТ, 2001.
5. А.Д. Гаджиев, В.Н. Писарев. Неявный конечно-разностный метод «Ромб» для численного решения уравнений газовой динамики с теплопроводностью. Журнал вычислительной математики и математической физики, 1979, т.19, № 5, С. 1288-1303.
6. В.Н. Писарев. Параметрическое семейство схем «Ромб» для двумерного уравнения теплопроводности. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1992, вып. 3, С. 42-48.
7. Г.И. Марчук. Методы расщепления. Москва, Наука, 1988, С.80-81.

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ ПУЗЫРЬКОВ ФЛОТАЦИОННОЙ ПЕНЫ

**Пыхов В.В.**

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

[VVPykhov@mephi.ru](mailto:VVPykhov@mephi.ru)

## ANALYSIS OF THE SIZE DISTRIBUTION OF FLOTATION FOAM BUBBLES

**Pykhov V.V.**

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research  
Nuclear University MEPHI, Chelyabinsk Region.*

[VVPykhov@mephi.ru](mailto:VVPykhov@mephi.ru)

Повышение эффективности процесса флотации и уменьшения влияния человеческого фактора на качество выходного продукта является актуальной проблемой. Эта проблема может быть решена с помощью машинного зрения. Для этого необходимо достаточно точно идентифицировать состояние технологического процесса и своевременно скорректировать управляющее воздействие. По сути целью является автоматизированная система управления с обратной связью на основе анализа изображения флотационной пены.

В статье приведены ряд зависимостей, отражающих ход процесса флотации в течении часа. Данные зависимости построены на основе гистограмм распределения по размерам пузырьков флотационной пены.

*Ключевые слова: процесс флотации, размеры пузырьков, равномерность гистограммы, ширина гистограммы*

Improving the efficiency of the flotation process and reducing the influence of the human factor on the quality of the output product is an urgent problem. This problem can be solved using machine vision. To do this, it is necessary to accurately identify the state of the technological process and correct the control action in a timely manner. In fact, the goal is an automated feedback control system based on image analysis of flotation foam.

The article presents a number of dependencies reflecting the course of the flotation process within an hour. These dependences are based on histograms of the size distribution of flotation foam bubbles.

*Keywords: flotation process, bubble sizes, histogram uniformity, histogram width*

## **Введение**

Повышение эффективности процесса флотации и уменьшения влияния человеческого фактора на качество выходного продукта является актуальной проблемой. Эта проблема может быть решена с помощью машинного зрения. Для этого необходимо достаточно точно идентифицировать состояние технологического процесса и своевременно скорректировать управляющее воздействие. По сути целью является автоматизированная система управления с обратной связью на основе анализа изображения флотационной пены.

В [1] было доказано влияние размеров пузырьков на качество процесса флотации. Проблема точной сегментации пузырьков является достаточно сложной, но успешно решается при использовании нейронной сети. Ранее в [2] была обучена нейронная сеть для сегментации флотационной пены. Нейронная сеть продемонстрировала хорошее качество распознавания пузырьков. Дальнейшим этапом стало применение полученных результатов для данных с реального производства [3].



## Анализ пузырьков в реальном времени

Возможность идентификации пузырьков в реальном времени была опробована на видеозаписи с реального производства [3]. Результат работы представлен на рисунке 1.

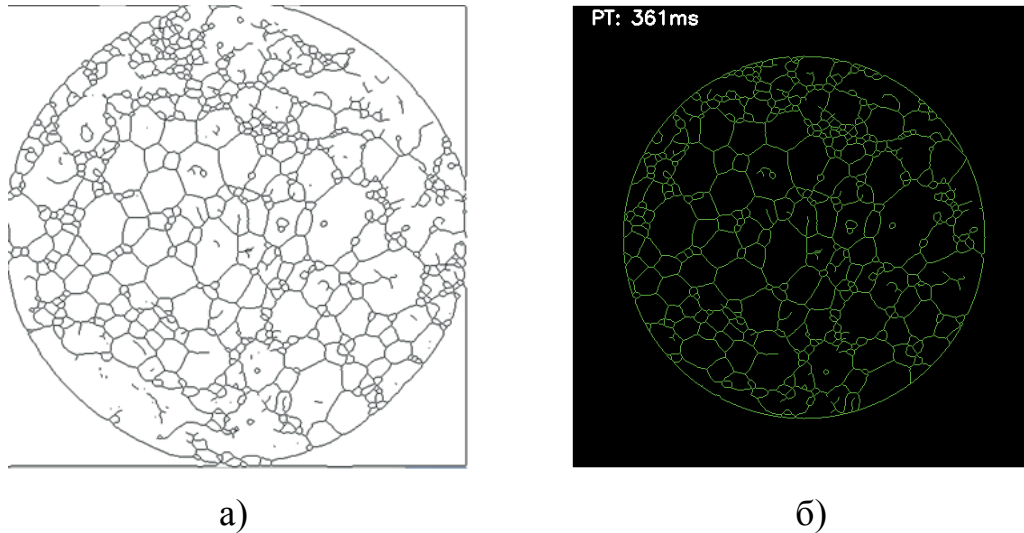


Рисунок 1. Результат сегментации видео в реальном времени.

Результат сегментации изображения нейронной сетью U-Net представлен на рисунке 1а. Изображение, полностью созданное из массива контуров, выделенных из результата сегментации представлено на рисунке 1б. Для численного представления используется гистограмма (рисунок 2).

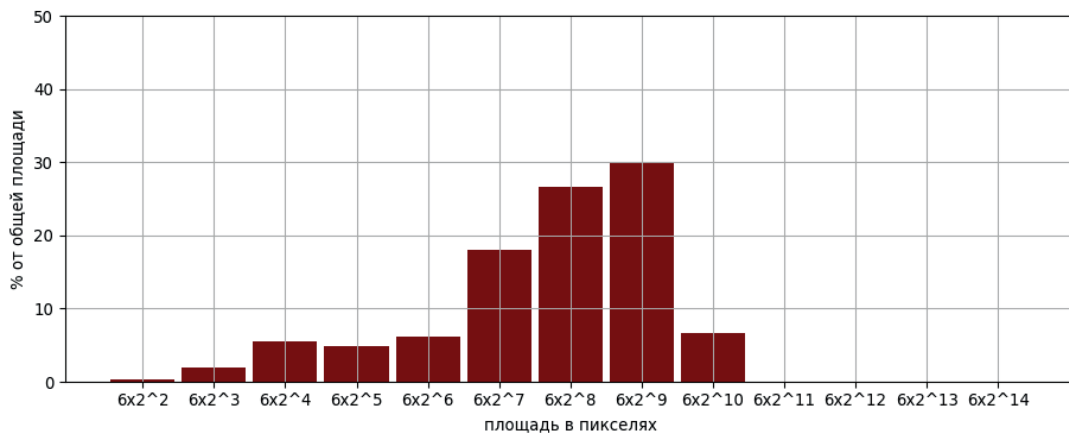


Рисунок 2. Распределение пузырьков по размерам.

На горизонтальной оси отложены значения категорий пузырьков согласно их площади. На вертикальной оси в процентах указано заполнение пузырьками заданного диапазона размеров от общей площади корректной области.

В теории, гистограмма должна содержать необходимую информацию, если размеры пузырьков отражают ход технологического процесса. Наиболее простым способом было бы выделение некой одномерной зависимости, отражающей изменение гистограммы (технологического процесса) со временем. Для поиска необходима длительная видеозапись, т.к. процесс достаточно медленный.

### **Определение зависимостей на основе длительной видеозаписи**

С предприятия была предоставлена видеозапись длительность один час. Распределение пузырьков анализировалось один раз в секунду. Работа программного обеспечения представлена на рисунке 3.

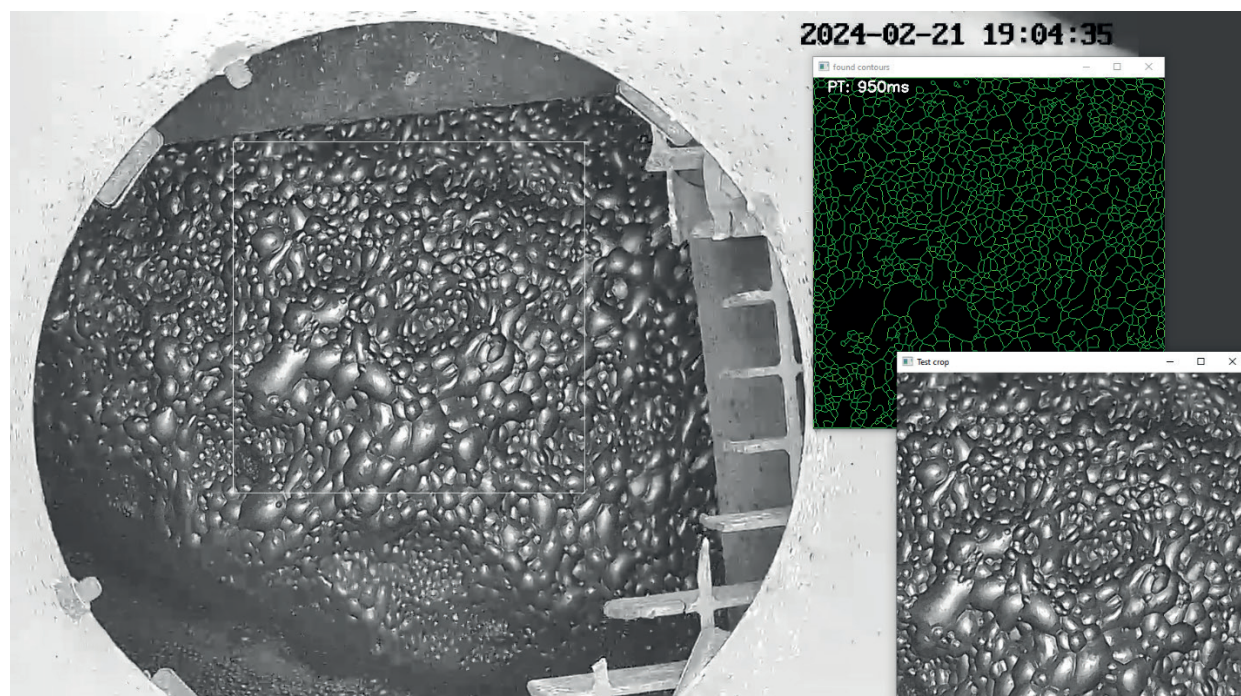


Рисунок 3. Процесс анализа изображения.

В отличие от рисунка 1, область анализа является прямоугольной. Размер и форма области настраиваются в программном обеспечении под реальные условия проведения видеосъёмки.

В ходе анализа гистограммы, было выделено несколько одномерных зависимостей. График, отражающий степень неравномерности гистограммы, представлен на рисунке 4.

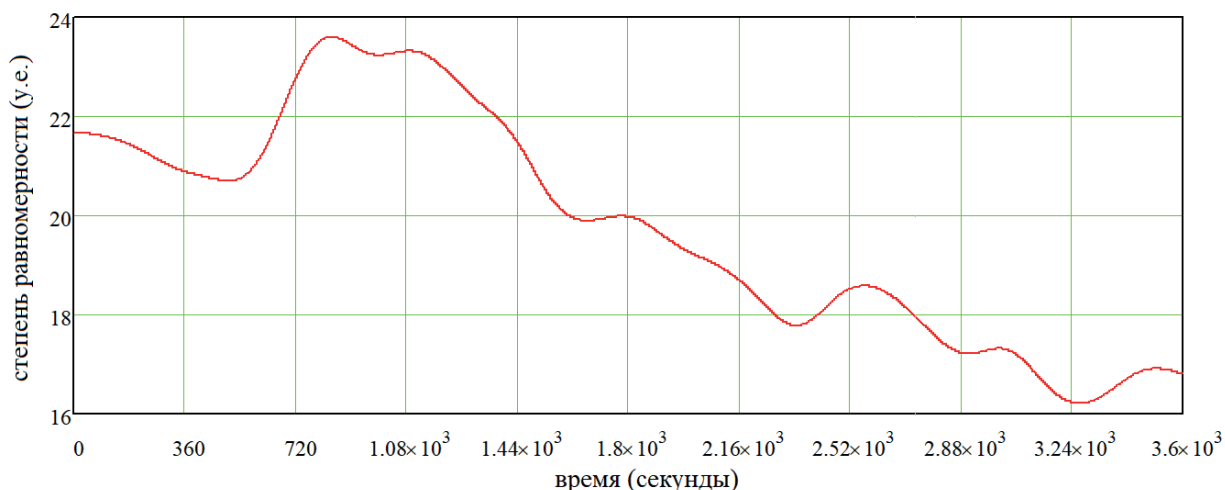


Рисунок 4. Равномерность гистограммы.

К графику применено сглаживание на интервале 250 секунд. Чем больше значение, тем более равномерное распределение пузырьков по размерам. Отчетливо видно изменение свойств гистограммы со временем. График соотношения между большими и маленькими пузырьками представлен на рисунке 5.

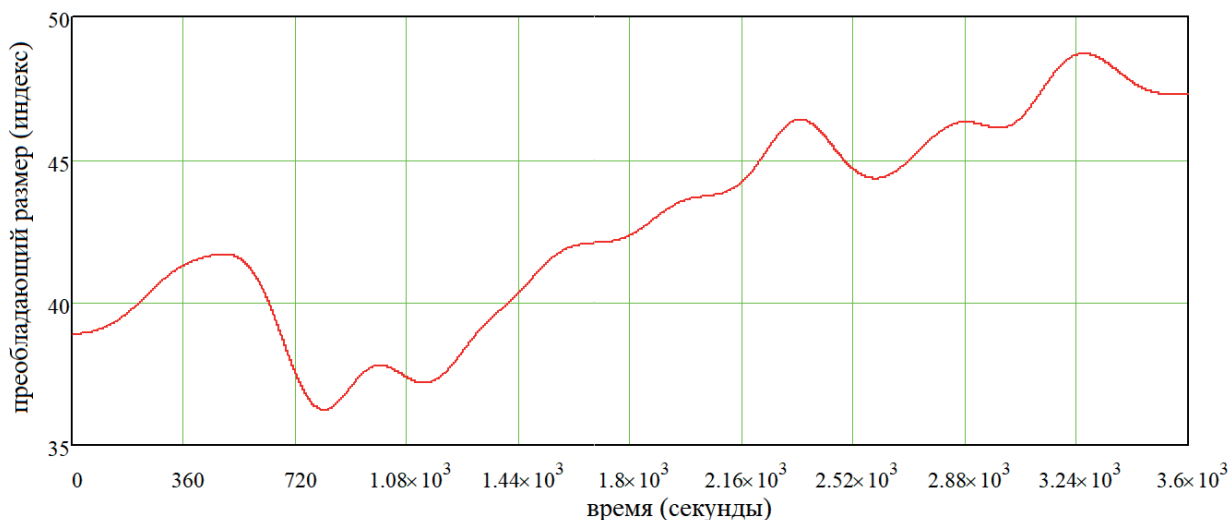


Рисунок 5. Распределение пузырьков по размерам.

К графику также применено сглаживание на интервале 250 секунд. Меньшее значение соответствует преобладанию маленьких пузырьков, большее – преобладанию больших пузырьков. На рисунке 6 представлена зависимость ширины гистограммы от времени. Представленные значения нормированы относительно максимального уровня для текущего измерения.

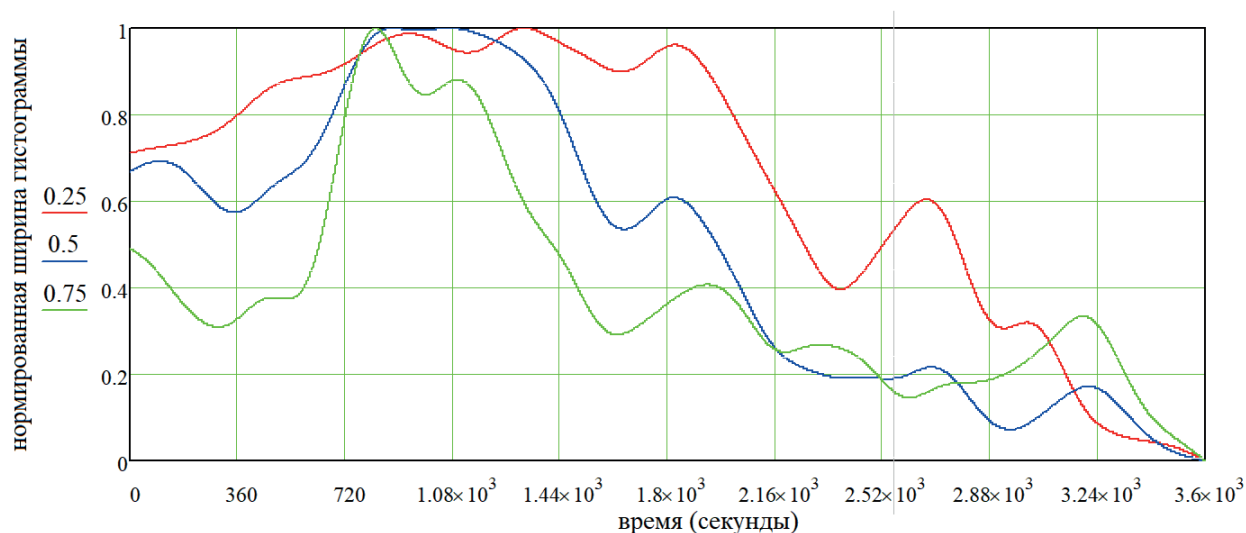


Рисунок 6. Ширина гистограммы.

Выбрано несколько контрольных уровней, по которым выполняется измерение: 0.25, 0.5, 0.75. Результат более сложного метода анализа неравномерности гистограммы представлен на рисунке 7.

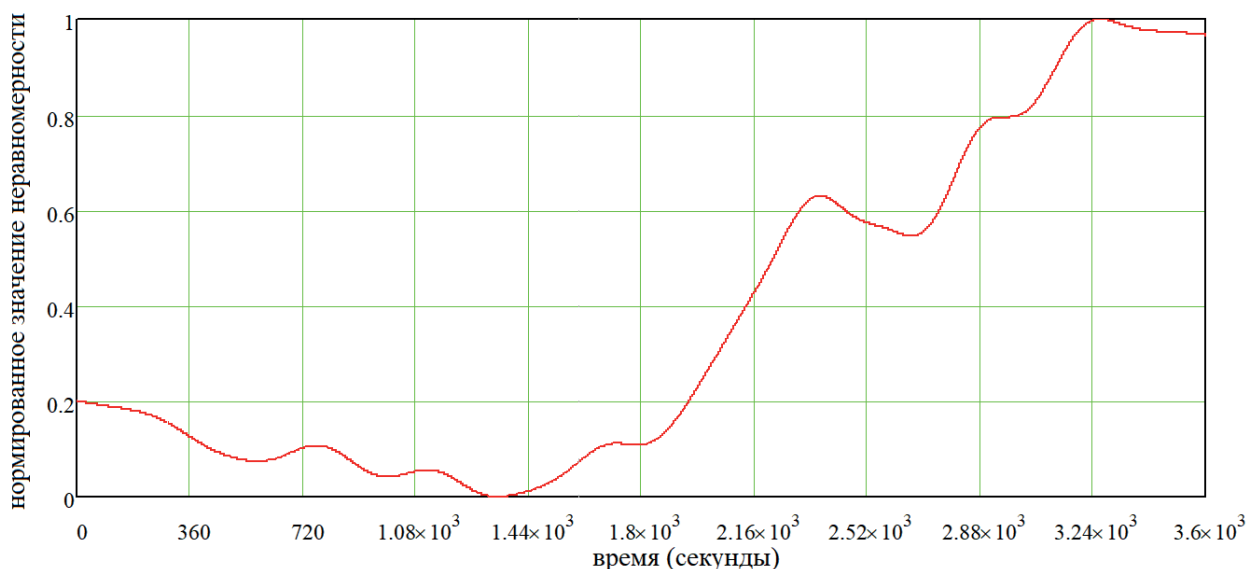


Рисунок 7. Неравномерность гистограммы.

Данный метод отличается более сложными расчетами и учитывает статистические распределения. Большое значение соответствует большей неравномерности.

### Заключение

Получены достаточно ярко выраженные зависимости. Причем характер изменения на всех представленных графиках примерно схожий. Для подтверждения и определения корреляции с реальным технологическим

процессом флотации необходимы данные инструментального контроля (содержание веществ до и после флотационной камеры) с привязкой ко времени.

### **Список литературы:**

1. Пыхов В.В., Шнайдер Д.А. Методы анализа изображений пены для оптимизации процесса флотации. НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 23-24 марта 2022 г. – М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 149–157.

2. Пыхов В.В. Сегментация пузырьков флотационной пены с помощью нейронной сети U-Net.

#### **0. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЕНЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ**

1. <http://omega.sp.susu.ru/glosic2023/articles/006.pdf>

2. [https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2024/04/tezisy\\_2024.pdf](https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2024/04/tezisy_2024.pdf) с. 227

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ, СНИЖАЮЩЕГО ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ О ПРЕГРАДУ

*Степанов Игорь Юрьевич*

*Снежинский физико-технический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Челябинская обл., г. Снежинск*

*[stepanovbrat@yandex.ru](mailto:stepanovbrat@yandex.ru)*

## SIMULATION OF A DAMPING DEVICE FOR A CAR THAT REDUCES THE INFLUENCE OF COLLISION WITH AN OBSTACLE

*Stepanov Igor Yurievich*

*Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI, Chelyabinsk Region, Snezhinsk*

### **Аннотация.**

В данной работе рассмотрен вариант защиты автомобиля, который должен выдерживать лобовой удар при скоростях от 10 км/ч до 30 км/ч. Расчеты проводились в программе конечно-элементного анализа. В идеальном варианте защита остается целой. Во всех трех вариантах расчета геометрическая модель пневмобаллона выдерживает нагрузку, разрушение конструкции не прогнозируется.

### **Abstract.**

In this paper, we consider an option for protecting a car that must withstand a frontal impact at speeds from 10 km/h to 30 km/h. Calculations were carried out using a finite element analysis program. Ideally, the protection remains intact. In all three calculation options, the geometric model of the pneumatic cylinder can withstand the load, and structural failure is not predicted.

**Ключевые слова:** *геометрическая модель, пневмобаллон, демпфирующее устройство*

**Keywords:** *geometric model, air cylinder, damping device*



В данной работе предлагается рассмотреть один из вариантов защиты автомобиля, которая должна выдерживать лобовой удар спереди при скоростях 10 км/ч, 20 км/ч и 30 км/ч без повреждений остальных частей автомобиля. В идеальном варианте защита тоже должна оставаться целой (вариант упругого поведения), либо получать незначительные повреждения в виде пластических деформаций отдельных элементов, которые можно легко и главное относительно дешево устранить.

Геометрическая модель пневмобаллона строилась по схеме изображенной на рисунке 1.

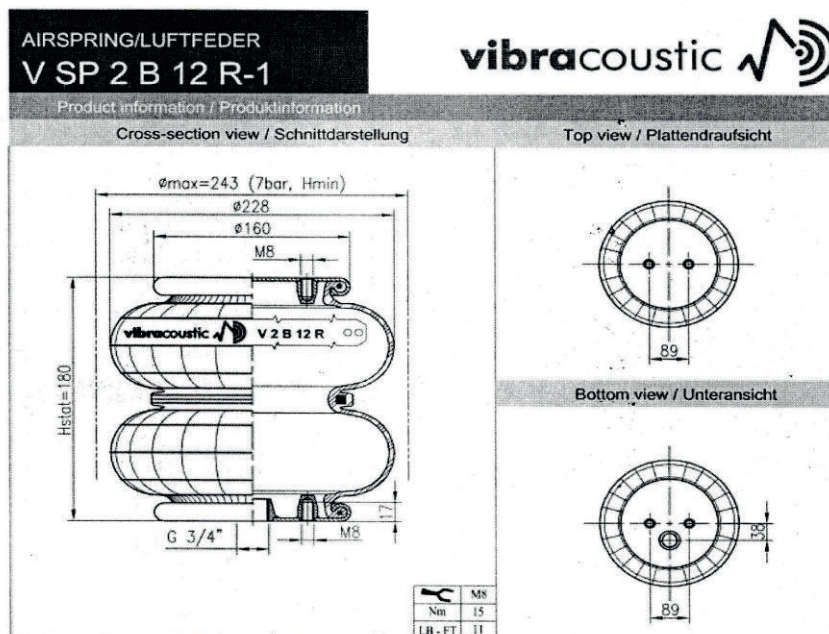


Рисунок 1 – Схема пневмобаллона

Для сокращения времени расчета было принято моделирование половины демпфирующего устройства. На рисунке 2 изображена геометрическая модель демпфирующего устройства. Демпфирующее устройство состоит из внутренней и внешней стальных пластин (длина которых 1500 мм), между пластинами размещены 5 пневмобаллонов на одинаковом расстоянии друг от друга (138 мм). Внутренняя пластина толщиной 4 мм, внешняя 2 мм. Высота пневмобаллонов - 180 мм, толщина стенок пневмобаллонов 10 мм. Граничные условия соответствуют ограничению перемещений узлов вдоль оси Z ( $U_z=0$ ). Нагружение геометрической модели пневмобаллона осуществлялось заданием равномерного внутреннего давления величиной 8 бар. Всей геометрической модели была задана начальная скорость в направлении оси  $U_y$  для трех расчётных случаев 10 км/ч, 20 км/ч, 30 км/ч. Моделировался прямой удар об стену.

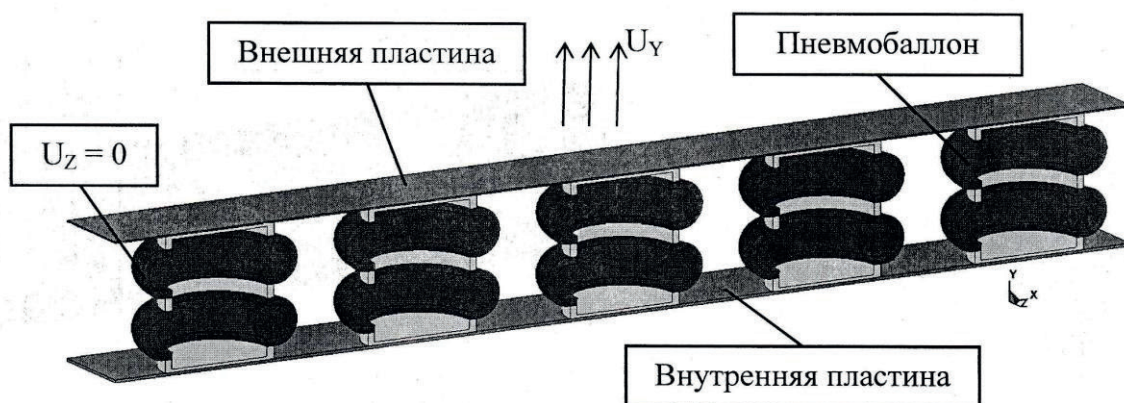


Рисунок 2 – Геометрическая модель демпфирующего устройства  
На рисунке 3 изображена конечно-элементная модель демпфирующего устройства.

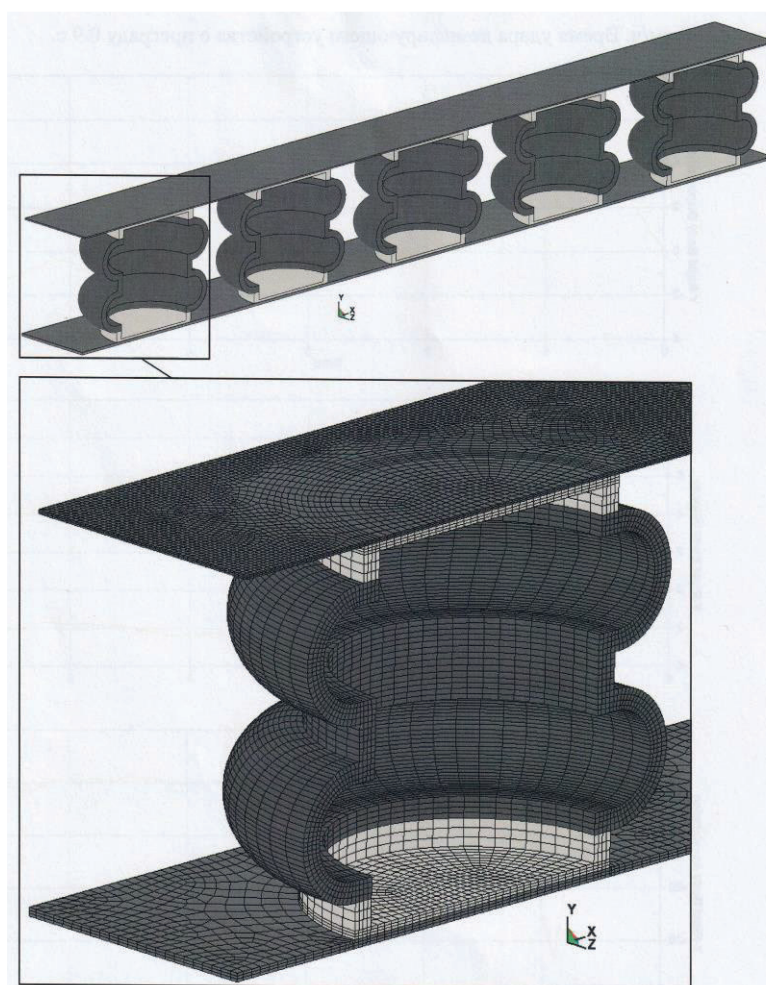


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель демпфирующего устройства

Давление внутри баллонов задается давлением на внутренние элементы стенок. Тип элемента - Solid. Модель материала стали plastic kinematic (используется для расчета изотропного и кинематического упрочнения материалов), в ней предусмотрена возможность учета влияния скорости деформации. Модель материала каучука elastic (упругий изотропный материал). В таблице 1 представлены свойства материалов.

Таблица 1 – Свойства материалов



	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа
Каучук	1200	10	0.4	28
Сталь	7850	$2 \cdot 10^5$	0.3	640

**1 расчетный случай.** Для скорости 10 км/ч, время удара демпфирующего устройства о преграду 2.5 с.

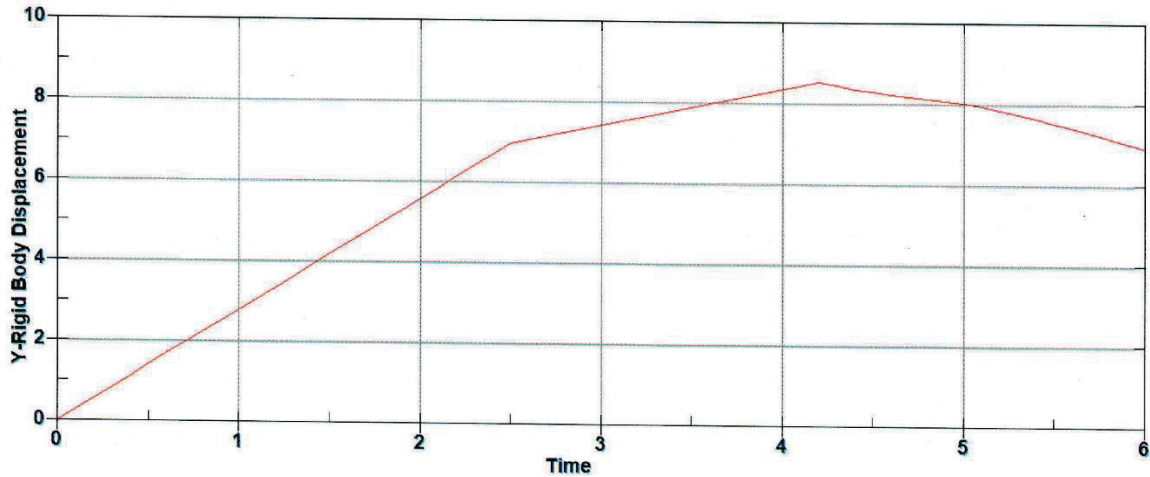


Рисунок 4 – График перемещения

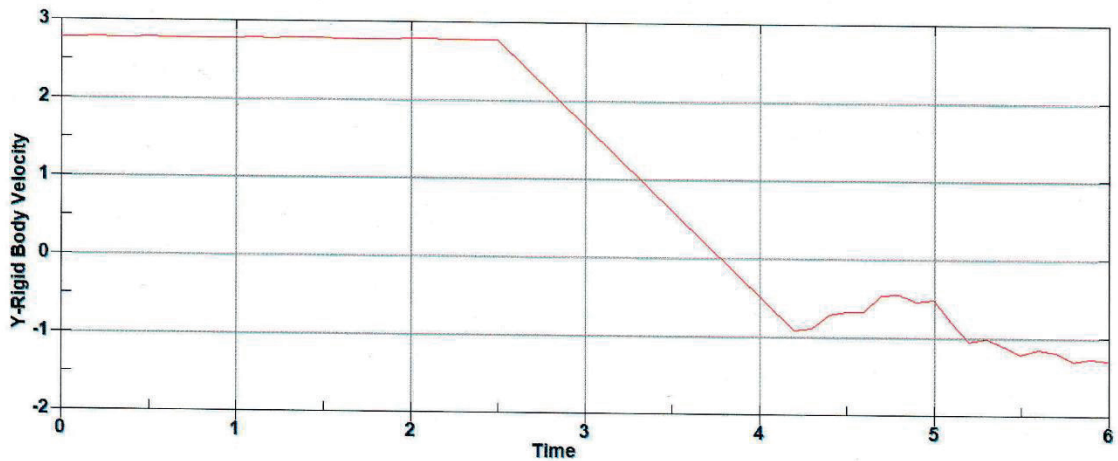


Рисунок 5 – График скорость

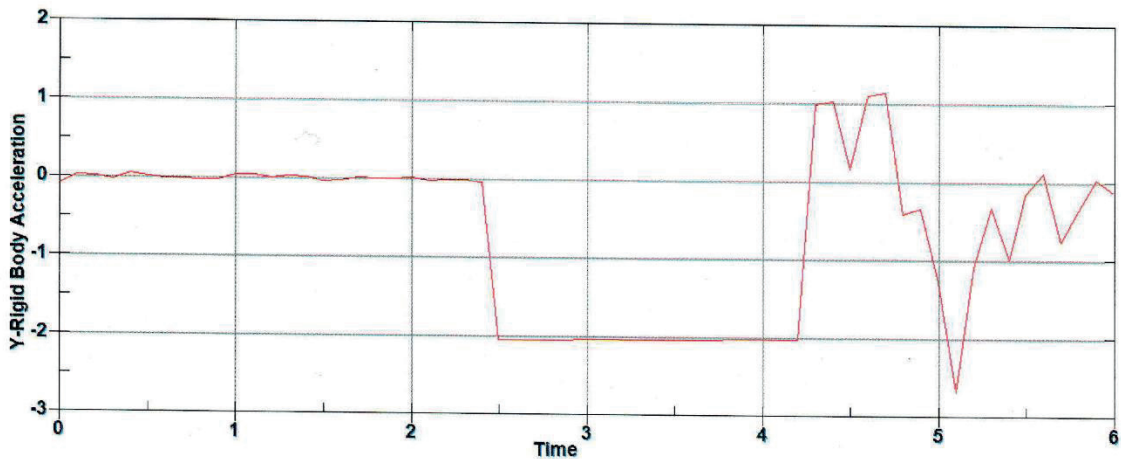


Рисунок 6 – График ускорения

**2 расчетный случай.** Для скорости 20 км/ч, время удара демпфирующего устройства о преграду 1.3 с.

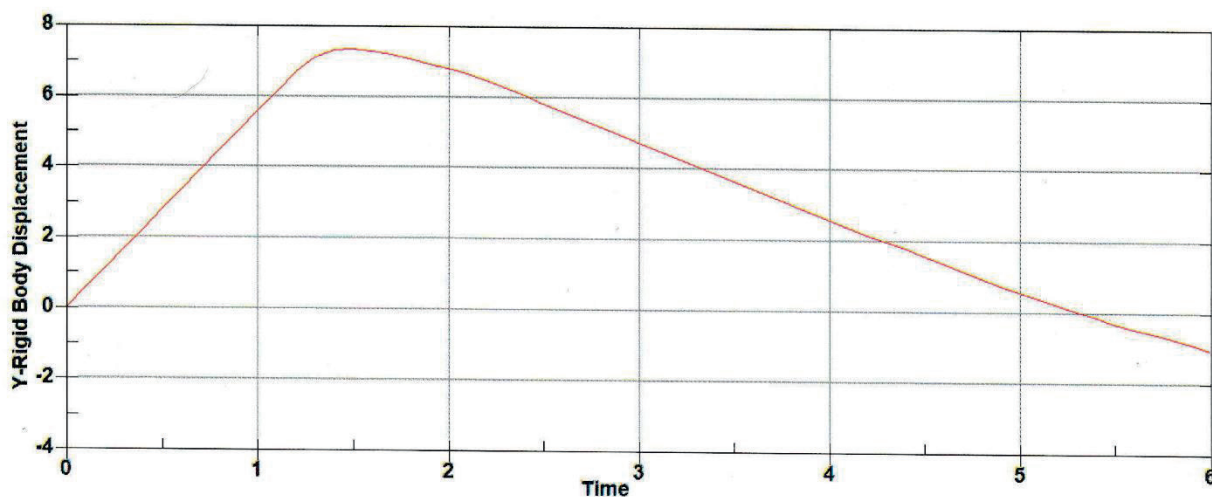


Рисунок 7 – График перемещения

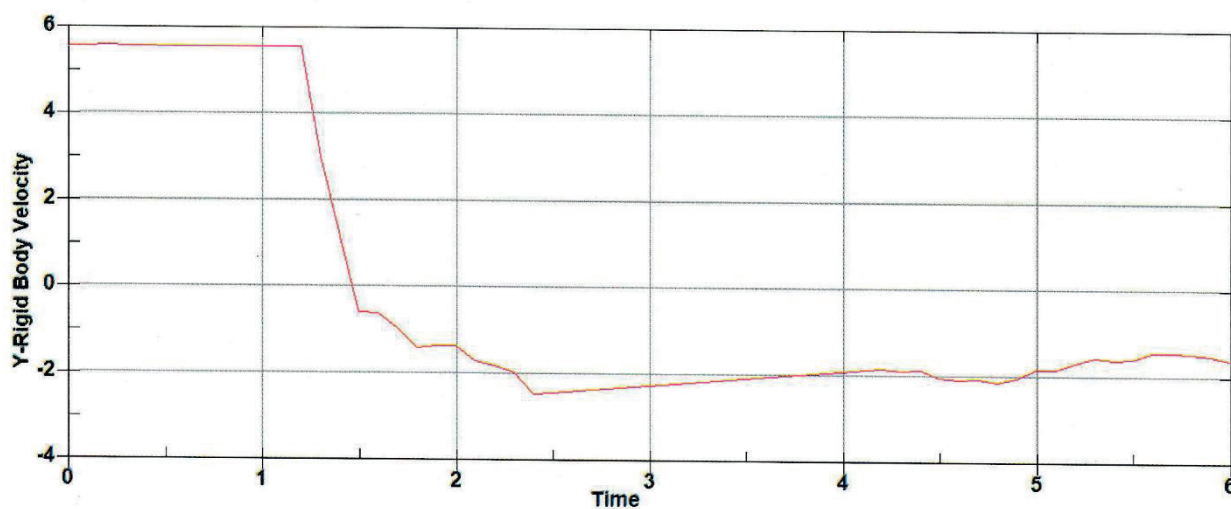


Рисунок 8 – График скорость

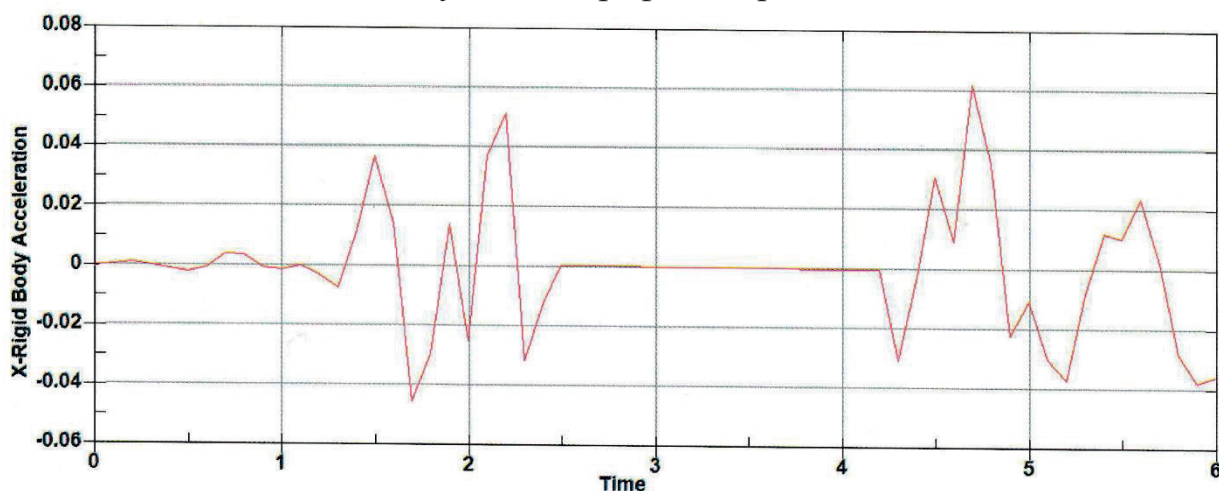


Рисунок 9 – График ускорения

**3 расчетный случай.** Для скорости 30 км/ч, время удара демпфирующего устройства о преграду 0.9 с.

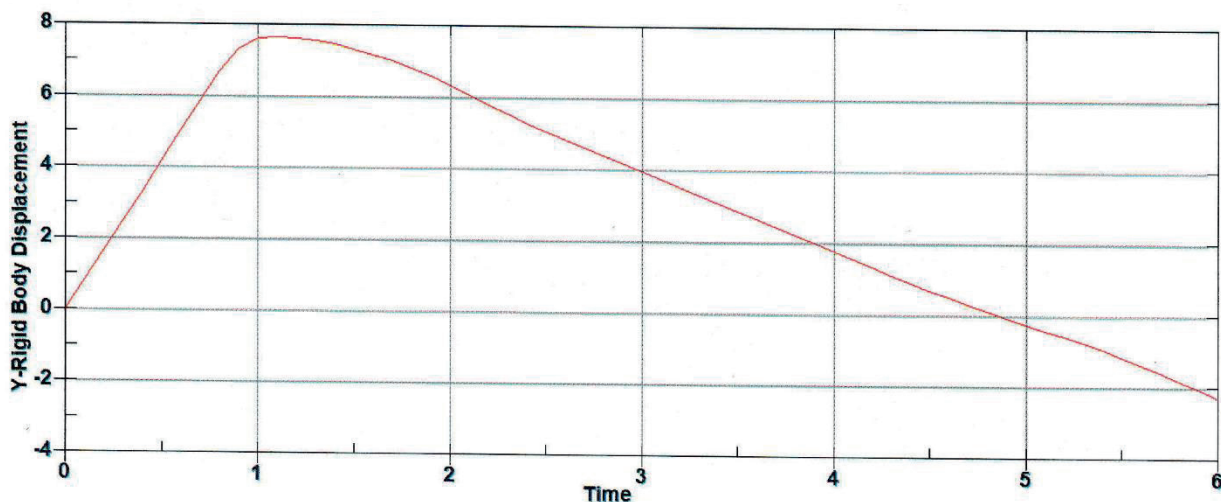


Рисунок 10 – График перемещения

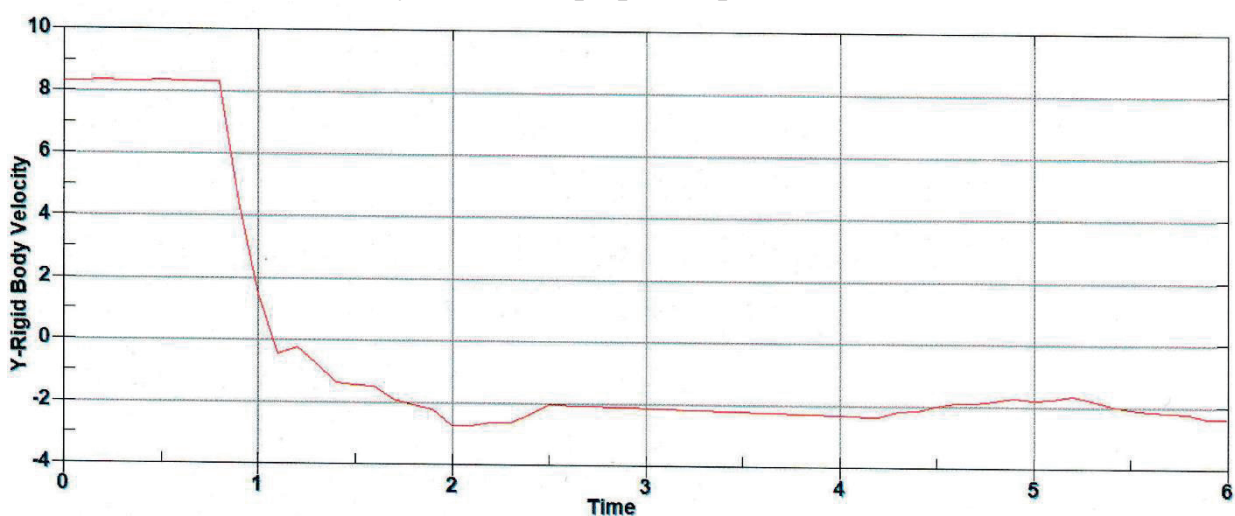


Рисунок 11 – График скорость

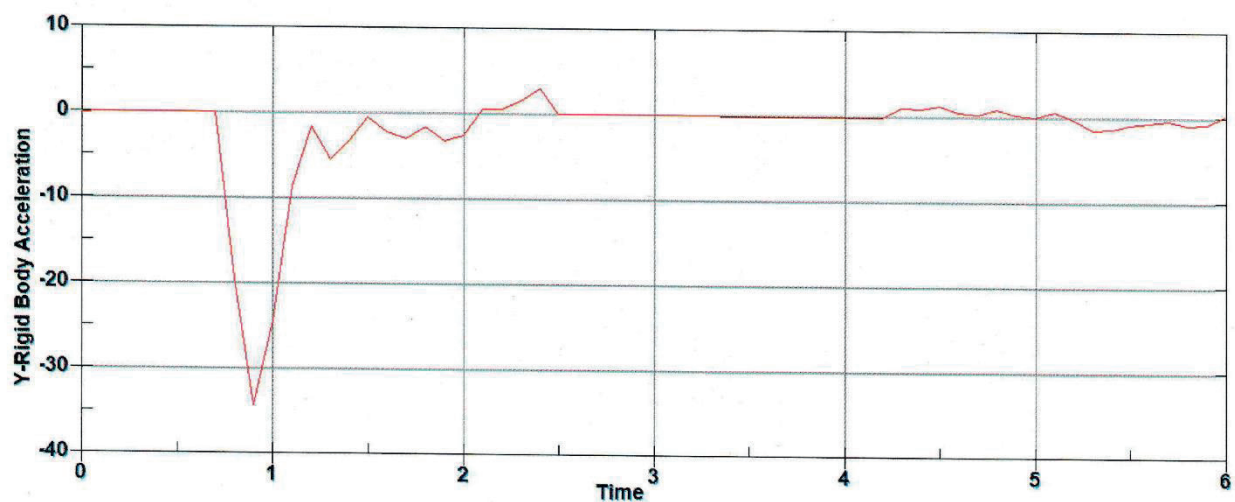


Рисунок 12 – График ускорения

В данной работе рассмотрен вариант защиты автомобиля, который должен выдерживать лобовой удар при скоростях от 10 км/ч до 30 км/ч. В идеальном варианте защита остается целой. Во всех трех вариантах расчета геометрическая модель пневмобаллона выдерживает нагрузку, разрушение конструкции не прогнозируется.

**Список литературы:**

1. Шкляр, М.Ф. Основы научных исследований [Текст] / М.Ф. Шкляр. — М.: Дашков и К0, 2008. - 243 с.

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ СЛОЖНОЙ  
ФОРМЫ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ  
СТАЛИ 12X18H10T**

*Столбиков А.А.*

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

[\*aleksey.stolbikov@yandex.ru\*](mailto:aleksey.stolbikov@yandex.ru)

**MANUFACTURING A SEALING SHELL OF COMPLEX SHAPE BY  
SELECTIVE LASER ALLOYING FROM STEEL 12X18H10T**

*Stolbikov A.A.*

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky  
Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University*

*MEPhI", Chelyabinsk region*

[\*aleksey.stolbikov@yandex.ru\*](mailto:aleksey.stolbikov@yandex.ru)

Аннотация. Рассмотрена возможность изготовления тонкостенных герметизирующих оболочек сложной формы из стали 12X18H10T методом селективного лазерного сплавления.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, герметизирующая оболочка.

Abstract. The possibility of manufacturing thin-walled sealing shells of complex shape from steel 12X18H10T by selective laser melting is considered.

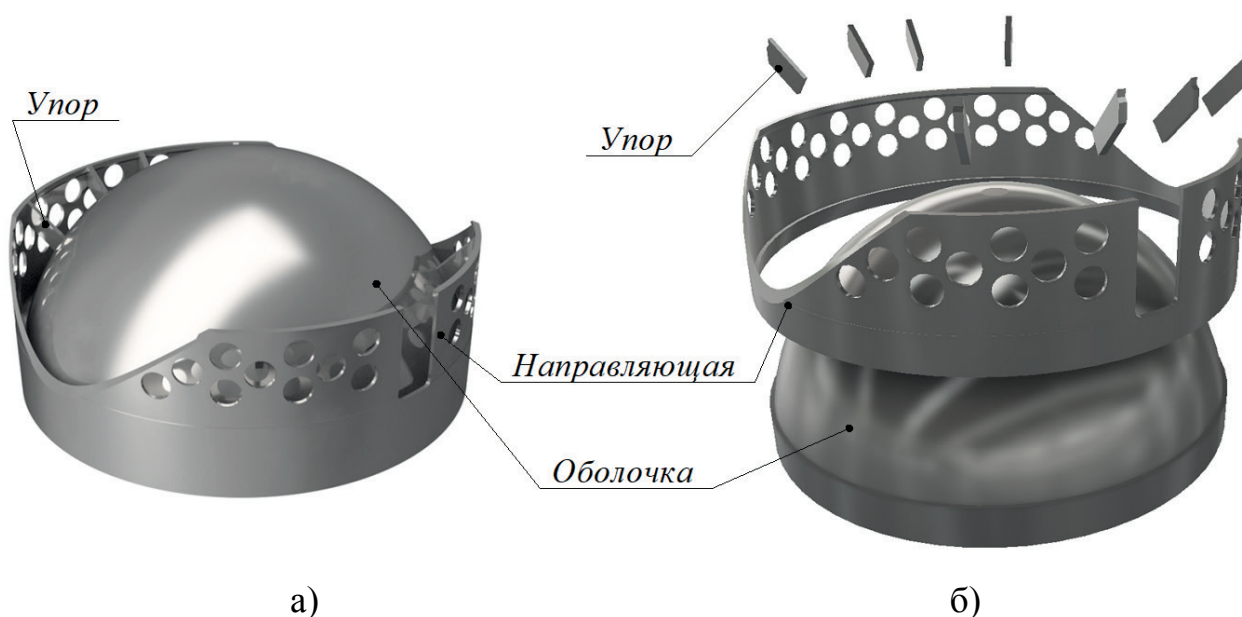
*Keywords:* additive technologies, selective laser melting, containment shell.



Селективное лазерное сплавление (СЛС) – это одна из основных технологий аддитивного производства изделий, позволяющая изготавливать как заготовки, так и сразу готовые к применению детали, из широкого спектра материалов начиная с алюминиевых сплавов заканчивая жаропрочными сталями и титаном.

Принцип работы установок по технологии СЛС заключается в послойном нанесении мелкодисперсионного металлического порошка на платформу построения и лазерной штриховке текущего сечения в соответствии с предварительно разработанной и разделенной на слои САД- моделью.

Оценка возможности изготовления герметизирующей оболочки сложной формы методом селективного лазерного сплавления из стали 12Х18Н10Т выполнялась на примере сборочной единицы представленной на **рисунке 1, а.**



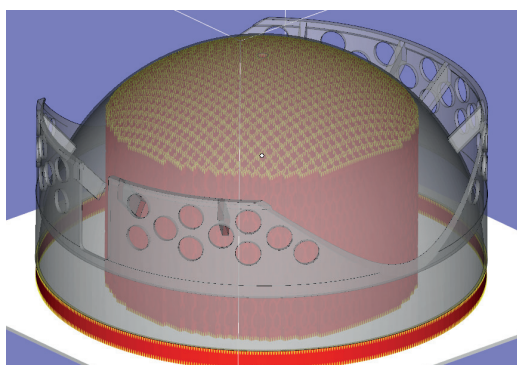
**Рисунок 1.** Изображение оболочки в сборе (а), детализовка (б)

Изделие представляет собой тонкостенную оболочку толщиной 0,5 мм, соединенную электронно-лучевой сваркой с направляющей имеющей конструктивные пазы и отверстия, и с упорами, соединенными лазерной сваркой. Схема с детализовкой оболочки представлена **на рисунке 1, б.**

### Пробное изготовление

При изготовлении изделие было расположено внутренней поверхностью вниз (рисунок 2, а) таким образом, что сформированные поддерживающие структуры, которые изготавливаются совместно с деталью, прилегают к торцу оболочки и его внутренней сферической поверхности.

Предварительно на установке Realiser SLM100 выполнена пробная печать герметизирующей оболочки. Результат изготовления представлен на рисунке 2, б).



а)

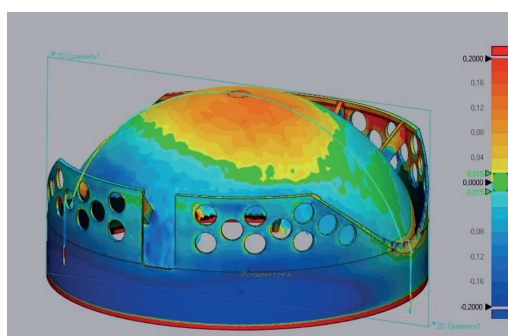


б)

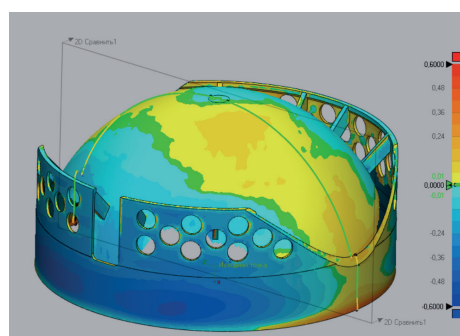
**Рисунок 2.** Модель со сгенерированными поддерживающими структурами (а).

Изготовленная деталь на платформе построения (б).

После изготовления выполнено 3D сканирование изделия до снятия с платформы построения и после снятия с платформы построения. Результат сканирования представлен на рисунках 3,а и 3,б).



а)



б)

**Рисунок 3.** Сравнение исходной модели со сканом детали на платформе построения (а) и после снятия с платформы построения (б)

Деталь до снятия с платформы построения имеет отклонение от номинальной модели  $\pm 0,2$  мм.

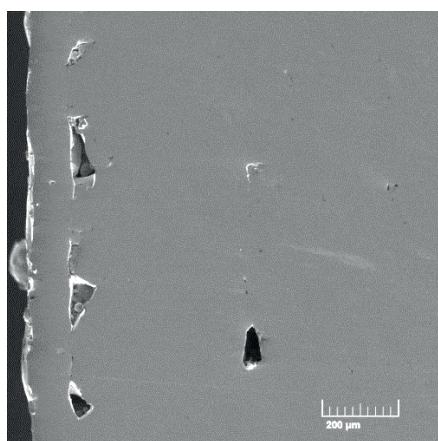
Выявлено что после снятия детали с платформы построения, геометрия детали изменилась, стала не цилиндрической, с отклонением от номинальной модели  $\pm 0,6$  мм. Причиной такого изменения являются внутренние напряжения в металле, созданные при сплавлении частиц порошка.

### Определение минимального припуска под механическую доработку

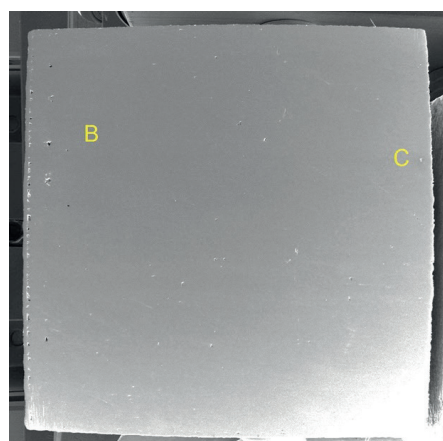
В связи с большой шероховатостью поверхностей и наличием поддерживающих структур, обусловленных технологией изготовления была проведена работа по определению «дефектного слоя», который необходимо снимать механически после изготовления на принтере. [1]

По результатам исследования определено, что максимальная толщина дефектного слоя 0,36 мм, что в свою очередь меньше чем рекомендуемый минимальный припуск в 0,5 мм под механическую доработку без нагартовывания материала.

На **рисунке 4** представлен характерный снимок дефектного слоя, ширина которого измерялась в работе.



а)



б)

**Рисунок 4.** - Характерные снимки дефектного слоя



Данные дефекты без механического удаления могут повлиять на механические характеристики материала и его герметичность, что важно для герметизирующих оболочек.

В связи с наличием дефектного слоя в месте соединения траекторий сплавления границы образца и сплавления его основной части, предположено, что данный тип дефектов получен из-за недостаточного перекрытия этих траекторий или из-за перегрева данной области на стыке двух траекторий [2]. Требуется доработка режимов сплавления для уменьшения количества внутренних дефектов и вследствие толщины дефектного слоя.

### **Удаление поддерживающих структур и улучшение качества поверхности химическим и электро-химическим воздействием**

Для удаления поддерживающих структур, улучшения шероховатости внутренних поверхностей деталей, которые невозможно обработать механически и очищение поверхностей от несплавленных частиц порошка была предпринята попытка использования химического и электро-химического воздействия на поверхности деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления.

При выполнении работы выявлено, что использовать химический метод для растворения поддерживающих структур не целесообразно в связи с большим растворением основного материала образца и увеличения шероховатости поверхностей.

Увеличение шероховатости при химическом растворении, связано с неравномерностью расплавления отдельных химических элементов стали или в связи с вскрытием газовых пор, которые были обнаружены при определении дефектного слоя.

Электрохимическая обработка показала улучшение шероховатости в среднем в 2 раза, и придало поверхностям глянцевый блеск.

### **Деформации при изготовлении**

Существенный недостаток технологии СЛС – большие термические деформации, возникающие вследствие действия остаточных напряжений из-за значительного градиента температур: при кристаллизации верхний сплавленный слой испытывает растягивающие напряжения, нижние – сжимающие. Как следствие – большие поводки, особенно после отделения выращенной заготовки от платформы.

Величина остаточных напряжений зависит от площади и сплошности изготавливаемого слоя. Чем больше площадь и сплошность, тем выше остаточные напряжения. В тонкостенных деталях при их изготовлении высоких напряжений образовываться не будет с точки зрения физики процесса. Но так как деталь тонкостенная, то даже не очень большие остаточные напряжения приводят к поводкам. Поэтому важной является задача обеспечения размерной точности деталей, изготовленных методом СЛС. В настоящее время в конструкторско-технологической подготовке производства активно используются цифровые модели и методы оптимизации. [3]

Методы оптимизации предназначены для компенсации действия остаточных напряжений путём введения предварительной коррекции геометрии детали по результатам конечно-элементного анализа.

В результате получается скорректированная мастер-модель, которая компенсирует термические поводки при изготовлении.

### **Заключение**

В ходе выполнения работ проведена оценка возможности изготовления герметизирующих оболочек сложной формы методом селективного лазерного сплавления из стали 12X18H10T. В результате определено, что изготовление оболочек возможно при соблюдении следующих условий:

- пористость материала в диапазоне от 0,1 до 0,25% [2];

- оптимизации модели путем компенсации остаточных напряжений по результатам конечно-элементного анализа [3].

Разработан технологический процесс, позволяющей изготовить заготовку методом селективного лазерного сплавления, подвергнуть ее электро-химическому полированию и механической доработке с обеспечением требований штатной конструкции.

### **Список литературы:**

1. Столбиков А.А., Чичимов Д.Е., Орлова Н.Ю., Юрченко О.С. Определение минимального припуска под последующую механическую доработку деталей, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления из стали 12X18H10T. Снежинский физико-технический институт, 2022.

2. Imade Koutiri, Etienne Pessard, Patrice Peyre, Ouafae Amlou, Thibaut De Terris. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. Journal of Materials Processing Technology, 2017

3. Степаненко И.С., Печенин В.А., Рузанов Н.В., Хаймович А.И. Методика повышения точности деталей ГТД, изготавливаемых селективным лазерным спеканием. Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва, 2018.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВОЗДУХА ТИПА ТОРНАДО

*Тютюник Александра Михайловна*

*Снежинский физико-технический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Челябинская обл., г. Снежинск*

## ANALYTICAL AND NUMERICAL MODELING OF TORNADO-TYPE AIR CURRENTS

*Tyutyunik Alexandra Mikhailovna*

*Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI, Chelyabinsk Region, Snezhinsk*

Разрушительная сила атмосферных вихрей (торнадо, смерчи, огненные торнадо, тропические циклоны) тревожит человечество, а эффективное распознавание и разработка методов борьбы с данными явлениями возможны при детальном изучении происходящих в них газодинамических процессов. Поэтому изучение течений политропного газа как сплошной среды в восходящих закрученных потоках является актуальным.

В работе получено нестационарное решение поставленной начально-краевой задачи для полной системы уравнений Навье-Стокса, описывающей нестационарные трехмерные течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа в восходящих закрученных потоках, а именно в придонной части таких потоков.

Приводится Теорема, на основании которой используется представление решения рассматриваемой задачи в виде бесконечных рядов. Также подробно описан модифицированный метод характеристик, используемый для построения численного решения поставленной задачи, являющийся собой известный метод характеристик, но с узлами расчетной сетки, заданными до начала счета.

Для системы уравнений газовой динамики построено решение одной конкретной характеристической задачи Коши с начальными данными на непроницаемой горизонтальной плоскости  $z = 0$ . Эта задача является характеристической задачей Коши стандартного вида, для которой справедлив соответствующий аналог теоремы Ковалевской. Теорема обеспечивает существование единственного аналитического решения.

Решение построено в виде начальных отрезков бесконечных рядов: для функций  $u$  и  $v$  при степенях по  $z^3$  включительно, для функций  $c$ ,  $w$  при степенях по  $z^4$  включительно. Коэффициенты рядов в стационарном случае определяются

при решении систем обыкновенных дифференциальных уравнений, а в нестационарном случае из систем уравнений с частными производными гиперболического типа, решение которых также сводится к решению обыкновенных дифференциальных уравнений. Построенные конечные отрезки рядов применяются для приближенного описания течений газа в придонных частях торнадо и тропического циклона.

Полученные результаты описывают сложные течения воздуха, имеющие место в реальных торнадо и тропических циклонах, и дают числовые характеристики газодинамических параметров этих течений.

#### **Список литературы:**

1. Баутин, С.П. Торнадо и сила Кориолиса / С.П. Баутин – Новосибирск: Наука, 2008. – 96 с.
2. Баутин, С.П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике / С.П. Баутин – Новосибирск: Наука, 2009. – 368 с.
3. Баутин, С.П. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса / С.П. Баутин, И.Ю. Крутова. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2019. – 181 с.
4. Баутин, С.П. Аналитическое и численное моделирование течения газа в придонной части восходящего закрученного потока / С.П. Баутин, А.В. Рощупкин // Проблемы прикладной математики, механики и информатики: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2009. - № 77(160). – С.18-40.
5. Баутин, С.П. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты торнадо / С.П. Баутин, К.В. Баутин, И.Ю. Крутова, А.Г. Обухов // Новосибирск: Наука; Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. – 216 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗЯТЦ

*Файрушина Ляйсан Римовна, Макеева Инга Равильевна*

*Всероссийский научно-исследовательский институт технической  
физики имени академика Е.И. Забабахина, Челябинская обл., г. Снежинск*

[fayrushinalr@vniitf.ru](mailto:fayrushinalr@vniitf.ru), [i.r.makeyeva@vniitf.ru](mailto:i.r.makeyeva@vniitf.ru)

## THE USE OF MATHEMATICAL MODELING TO SOLVE PROBLEMS ARISING DURING THE DEVELOPMENT AND DESIGN OF A CLOSED NUCLEAR FUEL CYCLE

*Liaisan Fayrushina, Inga Makeyeva*

*Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal  
Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of  
Technical Physics», Chelyabinsk Region, Snezhinsk*

### **Аннотация.**

В данной работе проведено сравнение функциональных характеристик программного комплекса (ПК) ВИЗАРТ [1, с. 317] с отечественными и зарубежными аналогами. Также в работе подробно описаны оптимизационный модуль [8] ПК ВИЗАРТ и математические методы оптимизации, реализованные в нем. Итогом данной работы, является демонстрация результатов решения многокритериальной оптимизационной задачи выбора наилучшего варианта фракционирования высокоактивных отходов (ВАО) при реализации замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с помощью ПК ВИЗАРТ.

### **Abstract.**

In this work the functional characteristics of the code VIZART [1, p. 317] were compared with domestic and foreign analogues. Also in this work were described in detail the optimization module [8] of the code VIZART and the mathematical optimization methods implemented in it. The result of this work is a demonstration of the results of solving the multi-criteria optimization problem of choosing the best variant of high-level waste fractionation in the closed nuclear fuel cycle implementation using code VIZART.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, замкнутый ядерный топливный цикл, радиоактивные отходы.

**Keywords:** mathematical modeling, closed nuclear fuel cycle, radioactive waste.

В качестве стратегического направления развития ядерной энергетики в России выбран ЗЯТЦ, поскольку он позволяет максимально эффективно использовать природные ресурсы и минимизировать количество радиоактивных отходов (РАО). Для разработки и внедрения технологических решений и процессов ЗЯТЦ потребуется проведение большого объема научно-исследовательской работы, а применение математического моделирования позволит оценить реализуемость и целесообразность принимаемых решений.

В настоящее время разработан ряд программных комплексов, моделирующих химико-технологических системы и позволяющие проводить инженерные расчеты различных химико-технологических процессов (ХТП). Однако, ни один из этих программных средств не предназначен для моделирования всего комплекса технологий ЗЯТЦ, обеспечивающих необходимое качество конечных и промежуточных продуктов, в промышленном масштабе. Поэтому специалистами РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина и ВНИИНМ им. А.А. Бочвара разработан и продолжает развиваться ПК ВИЗАРТ [1, с. 317], предназначенный для моделирования и оптимизации как отдельных технологических процессов замыкающей части топливного цикла (переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), рефабрикация топлива и обращение с РАО, включая захоронение), так и технологий ЯТЦ в целом. Программный комплекс ВИЗАРТ позволяет решать такие задачи как обоснование реализуемости технологических решений, выбор и оптимизация режимов технологических процессов, оценка решений по организации технологических линий.

После разработки ПК ВИЗАРТ был проведен сравнительный анализ функциональных характеристик данного программного комплекса с отечественными и зарубежными средствами моделирования ХТП (Aspen HYSYS [2], Aspen Plus [3], SimSci-Esscor DYN SIM [4], SimSci-Esscor PRO/II [5], Chemstations ChemCAD [6], GIBBS [7]), не являющихся прямыми аналогами ПК ВИЗАРТ в связи с узкой направленностью последнего на моделирование радиохимических технологий и производств. Анализ средств компьютерного моделирования ХТП показал, что существует значительное количество специализированных средств для моделирования технологических процессов, которые обладают различным функционалом и назначением. Однако, каждый из рассмотренных радиохимических кодов ориентирован на отдельный процесс или технологию, из чего следует, что ПК ВИЗАРТ является более гибким и универсальным средством в сравнении с зарубежными кодами из области моделирования радиохимических технологий.

Одной из актуальных задач при разработке технологий замкнутого ЯТЦ и проектировании производств опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) и промышленного энергокомплекса (ПЭК) является оптимизация затрат на обращение с ОЯТ и РАО. С помощью оптимизационного модуля [8], входящего в состав ПК ВИЗАРТ, была решена многокритериальная оптимизационная задача выбора наилучшего варианта реализации ЗЯТЦ.



В докладе будет представлена сравнительная таблица возможностей современных ПК, предназначенных для моделирования ХТП, краткое описание оптимизационного модуля программного комплекса ВИЗАРТ и результаты решения оптимизационной задачи, полученные с использованием оптимизационной подсистемы ПК ВИЗАРТ.

### **Список литературы:**

1. Шмидт О.В., Макеева И.Р., Ливенцов С.Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств // Радиохимия, 2016. Т. 58, № 4. С. 316–323.
2. Aspen Hysys [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys> (дата обращения 06.04.2024).
3. Aspen Plus [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://www.aspentech.com/ru/products/pages/aspenone-overview> (дата обращения 06.04.2024).
4. SimSci-Esscor DYN SIM [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: [https://www.se.com/us/en/download/document/DYNSIM\\_Simulation/](https://www.se.com/us/en/download/document/DYNSIM_Simulation/) (дата обращения 06.04.2024).
5. SimSci-Esscor PRO/II [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://www.automation.com/en-us/products/product18/simsci-esscor-enhances-proii-simulation-software> (дата обращения 06.04.2024).
6. Chemstations ChemCAD [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <http://www.chemstations.com/> (дата обращения 06.04.2024).
7. GIBBS [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <http://www.gibbsim.ru/> (дата обращения 06.04.2024).
8. Makeyeva I.R., Rykunova A.A., Dubosarsky V.G., Pugachev V.Yu., Shmidt O.V., Evsyukova Yu.A. Calculation and Optimization of Technology Parameters for Closing Stage of Nuclear Fuel Cycle using VIZART code / Proceedings of GLOBAL, 2017 September 24-29, Seoul (Korea). Paper EA-318-PD1.

**ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ  
С УЧЕТОМ РЕФРАКЦИИ И ОТРАЖЕНИЯ**

**Юсупов Ю. Ф.**<sup>1,2</sup>,

Глазырин И. В.<sup>1,2</sup>, Говрас Е. А.<sup>1</sup>, Михайлов Н. А.<sup>1</sup>, Титова А. М.<sup>1</sup>

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

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

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

**THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL OF THE INTERACTION OF LASER  
RADIATION WITH MATTER IN THE GEOMETRIC OPTICS APPROXIMATION,  
TAKING INTO ACCOUNT REFRACTION AND REFLECTION**

**Yusupov Yu. F.**<sup>1,2</sup>,

Glazyrin I. V.<sup>1,2</sup>, Govras E.A.<sup>1</sup>, Mikhaylov N. A.<sup>1</sup>, Titova A. M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin», Snezhinsk, Chelyabinsk region

<sup>2</sup> Snezhinsk Physics and Technology Institute of National Research Nuclear University  
MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region

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

Для расчёта поглощения лазерного излучения веществом в приближении геометрической оптики в трёхмерную газодинамическую программу добавлен численный метод моделирования распространения излучения в среде. Реализованы отражение лучей от поверхности критической плотности и рефракция. Модель поглощения основана на обратнотормозном механизме в докритической области. В закритической области для определения поглощенной энергии использовались формулы Френеля.

Численный метод верифицирован на одномерной и двумерной задачах, которые имеют аналитическое решение. Модель является универсальной и способна работать в одномерной, двумерной (в том числе и осесимметричной) и трёхмерной геометриях.

*Ключевые слова:* приближение геометрической оптики, обратнотормозное поглощение, трассировка, критическая плотность электронов, рефракция, верификация, анализ экспериментальных данных

To simulate the laser absorption by matter in the geometric optics approximation, a numerical method for modeling the propagation of radiation in a medium has been added to the

three-dimensional fluid dynamics program. Reflection of rays from a surface of critical density and refraction are implemented. The absorption model is based on the inverse-Bremsstrahlung mechanism in the subcritical region. In the supercritical region, Fresnel formulas were used to determine the absorbed energy.

The numerical method has been verified on one-dimensional and two-dimensional problems that have an analytical solution. The model is universal and can work in one-dimensional, two-dimensional (including axisymmetric) and three-dimensional geometries.

*Keywords: geometric optics approximation, inverse-Bremsstrahlung absorption, ray tracing, critical electron density, refraction, verification, analysis of experimental data*

Для исследования развития газодинамических неустойчивостей используются мощные лазерные установки [1,2,3]. Большое количество работ посвящено численному моделированию взаимодействия лазерного импульса с веществом [4]. В трёхмерную газодинамическую программу [5], предназначенную для расчётов перемешивания веществ, добавлен учёт распространения и поглощения энергии лазерного излучения. Выбрана модель, основанная на приближении геометрической оптики с механизмом обратнотормозного поглощения, рефракцией и отражением.

Модель описана в [6] и имеет следующие особенности:

- траектория луча внутри ячейки является прямолинейной;
- на гранях ячеек учитывается преломление и отражение каждого луча;
- лазерный пучок формируется в произвольной области внутри или вне расчетной неструктурированной сетки с помощью двух формирующих эллипсов;
- используется однотемпературное приближение с определением среднего атомного заряда и веса вещества с помощью табличных значений;
- программа распараллелена на общей и распределенной памяти, формирование лазерного пучка возможно как в последовательном, так и в параллельном режиме на декомпозированной сетке.

Суммарная энергия пучка  $Q$  вычисляется по формуле

$$Q(t) = \int_{t_0}^t P(t') dt' \approx \sum_{t_0}^t \frac{P(t_{i+1}) - P(t_i)}{2} (t_{i+1} - t_i), \quad (1)$$

где  $P(t)$  – функция распределения мощности пучка (изотропное, гауссово или супергауссово). Также, в отличие от работы, представленной в [6], добавлена возможность задавать плотность лучей пропорционально распределению энергии внутри пучка. Величина энергии пучка за один временной шаг определяется методом трапеций:

$$Q_n = \frac{P(t_{i+1}) - P(t_i)}{2} (t_{i+1} - t_i) = \sum_{j=0}^{N_{\text{ячейк}}} q_j. \quad (2)$$

Потеря энергии  $j$ -го луча зависит от пройденного расстояния внутри ячейки  $l_i$

$$q_j = q_{j0} \cdot e^{-K_i^{\text{отп}} l_i}. \quad (3)$$

Здесь  $K_i^{\text{отп}}$  – коэффициент обратно-тормозного поглощения, который определяется как:

$$K^{\text{отп}} = \frac{\sqrt{2}\omega}{c} \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\eta}} \sqrt{\sqrt{1+\eta} \sqrt{1 + \frac{\eta}{(1-\xi)^2}} - \frac{\eta}{1-\xi}} - 1, \quad \xi = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{n_e}{n_{cr}}, \quad \eta = \frac{v_{ei}^2}{\omega^2}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – круговая частота лазерного излучения,  $\omega_p$  – плазменная частота,  $v_{ei}$  – частота электрон-ионных столкновений для данного вещества (может вычисляться как по формулам, так и с помощью логарифмической интерполяции таблиц),  $c$  – скорость света,  $n_{cr}$  – критическая плотность электронов,  $n_e$  – плотность электронов.

Преломление луча на границе двух ячеек описывается с помощью закона Снелла [7]. Луч может преломиться на границе ячейки, пройти без изменения направления в случае падения луча по нормали к грани ячейки, либо отразиться в случае достижения критического угла падения или ячейки с критической плотностью (см. рисунок 1а).

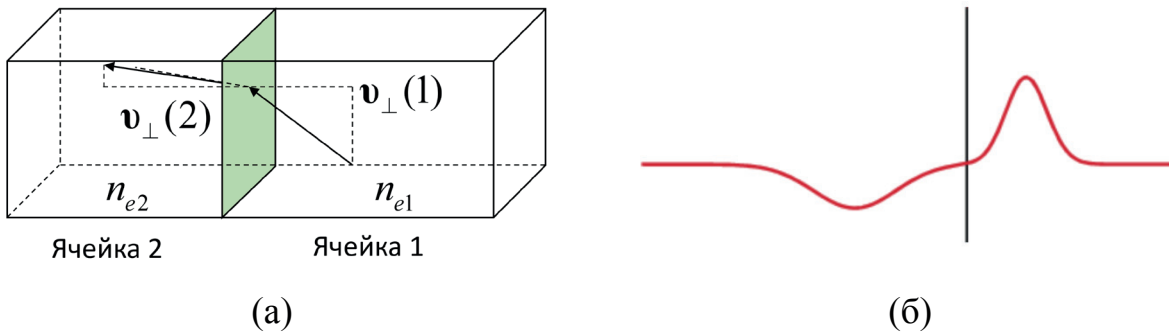


Рисунок 1 – Изменение направления движения луча на грани ячейки (а) и схематическое описание изменения амплитуды электромагнитной волны после отражения от критической плотности согласно формулам Френеля (б)

Важной особенностью приближения геометрической оптики является невозможность проникновения излучения в закритическую плазму. Как правило, данная проблема решается поглощением всей падающей энергии в закритической области на начальном этапе распространения лазерного импульса [8], чего не происходит в реальности. На самом деле необходимо решать систему уравнений Максвелла, что требует огромных вычислительных ресурсов. Допустимым приближением является решение стационарного уравнения

Максвелла – уравнения Гельмгольца, однако оно применимо лишь тогда, когда размер ячейки сильно меньше длины волны лазерного излучения, что также накладывает ограничение по вычислительным ресурсам. Поэтому был предложен подход, основанный на использовании формул Френеля [8], которые позволяют определить долю энергии, поглощающейся в закритической области (см. рисунок 1б). Данный метод используется на протяжении всего лазерного импульса, а не только на начальном этапе. Доля поглощенной энергии определяется как

$$A = 1 - \frac{1-r}{1+r}, r = \sqrt{2} \frac{\sqrt{1+\eta-\xi} + \sqrt{1+\eta} \sqrt{\eta+(\xi-1)^2}}{\sqrt{1+\eta} + \sqrt{\eta+(\xi-1)^2}}. \quad (5)$$

Был проведен расчет воздействия импульса лазерного излучения с максимальной интенсивностью  $I = 8,9 \cdot 10^{10} \text{ Вт/см}^2$  и полной шириной на половине высоты  $t_{\text{имп}} = 0,75 \text{ нс}$  на медную мишень толщиной  $100 \text{ мкм}$ . Видно, что трёхмерный и двумерный осесимметричный расчеты дают близкую картину (см. рисунок 2).

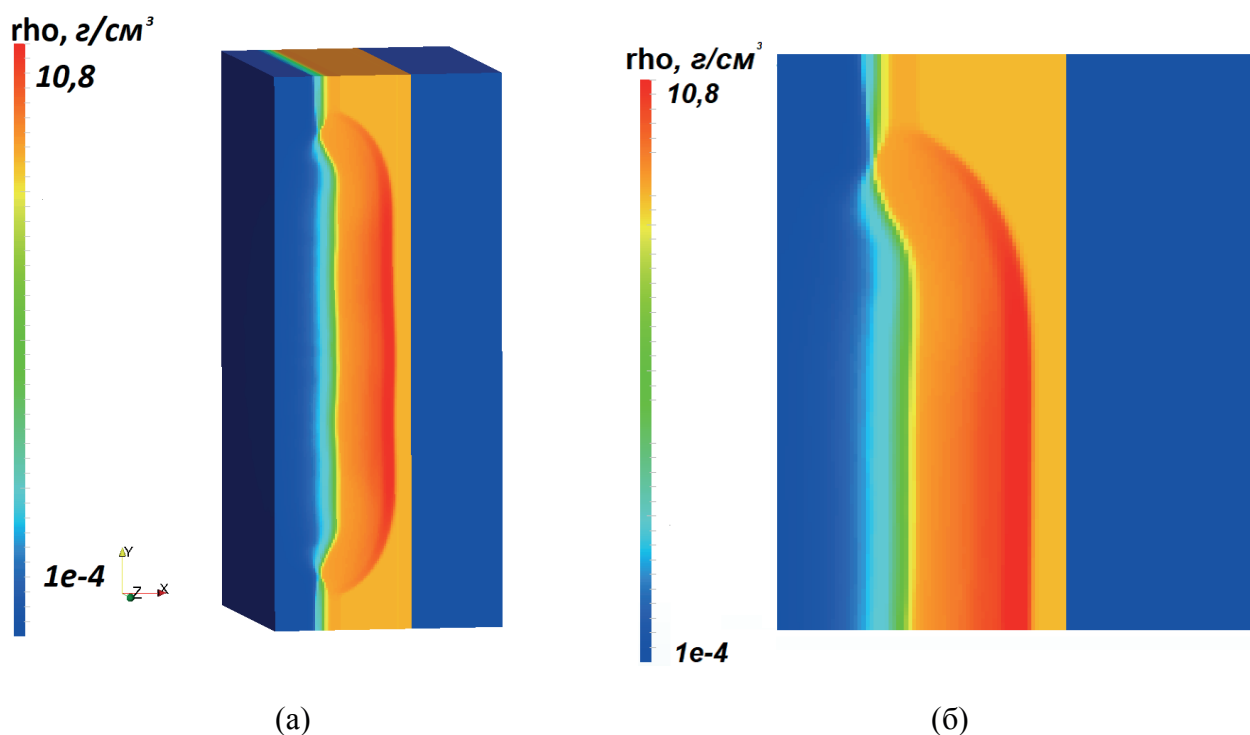


Рисунок 2 – Профили плотности в расчете на одинаковый момент времени  $t = 17 \text{ нс}$  от начала воздействия импульса лазерного излучения в трехмерном случае (а) и в двумерном осесимметричном случае (б)

Модель прошла верификацию на одномерной задаче о прохождении луча по системе с профилированной плотностью. Корректность определения направления луча после

преломления была проверена в двумерной постановке. Полученные численные результаты согласуются с аналитическими решениями с хорошей точностью. Проведен сравнительный расчет воздействия импульса лазерного излучения на медную мишень. Показано, что осесимметричный двумерный расчет удовлетворительно согласуется с трёхмерным расчетом.

### Список литературы:

- 1 McCrory R.L., Bahr R.E. et al. Omega ICF experiments and preparation for direct drive ignition on NIF // Nuclear Fusion – 2002.
- 2 K.S. Raman, O.A. Hurricane, H.S. Park, B.A. Remington, H. Robey, V.A. Smalyuk. Three-dimensional modeling and analysis of a high energy density Kelvin-Helmholtz Experiment Physics of Plasmas, 22 2012. LLNL-JRNL-531731
- 3 A.R. Miles, M.J. Edwards, B. Blue, J.F. Hansen, H.F. Robey, R.P. Drake, C. Kuranz, and D.R. Leibbrandt The effect of a short-wavelength mode on the evolution of a long-wavelength perturbation driven by a strong blast wave/ Physics of Plasmas 11, 5507 2004.
- 4 Dodd E. S., Benage J. F., Kyrala G. A. et al. The effects of laser absorption on direct-drive capsule experiments at OMEGA // PHYSICS OF PLASMAS. – 2012. P. 517-535.
- 5 Глазырин И.В., Михайлов Н.А. Конечно-объёмная схема для многокомпонентных сжимаемых течений на неструктурированной сетке в трехмерной программе ФОКУС // // ЖВМиМФ. – 2021. – 61, 6, – С.1019.
- 6 Ю.Ф. Юсупов, И.В. Глазырин, Е.А. Говрас, Н.А. Михайлов, А.М. Титова, М.Н. Чижков. Трёхмерное численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с веществом в приближении геометрической оптики // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 31 января –2 февраля 2023г. – М.:НИЯУ
- 7 Thomas B. Kaiser. Laser ray tracing and power deposition on an unstructured three-dimensional grid // PHYSICAL REVIEW E. – 1999. P. 219-240.
- 8 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. Оптика. – 3-е изд. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 792 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДАМБ ДРАЖНЫХ КОТЛОВАНОВ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ**

**Ярушин К. М.**

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

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

[n.gorin@vniitf.ru](mailto:n.gorin@vniitf.ru)

## **STADY OF THE CONDITION OF DAMS IN DREDGE PITS USING ELECTROTOMOGRAPHY**

**Yarushin K. M.**

<sup>1</sup>FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin», Snezhinsk,  
Chelyabinsk region

<sup>2</sup>Snezhinsk Physics and Technology Institute of National Research Nuclear  
University MEPHI, Snezhinsk, Chelyabinsk region

[n.gorin@vniitf.ru](mailto:n.gorin@vniitf.ru)

Аннотация. В докладе представлены результаты применения метода сплошных электрических зондирований (электротомографии) для исследования технического состояния дамб дражного котлована.

Ключевые слова: россыпное месторождение, геофизические исследования, электротомография, геоэлектрический разрез, удельное электрическое сопротивление.

Summary. The article presents an example of using the electroyomografy method to study the technical condition of dams in a dredge pit.

Key words: alluvial deposit, geophysical research, electrotomography, geoelectric section, electrical resistivity.



В настоящее время одним из перспективных направлений в горной промышленности является добыча драгоценных камней и благородных металлов на россыпных месторождениях. Условия залегания россыпей позволяют производить их эффективную разработку с применением относительно простых технологий. Высокие технико-экономические показатели имеет дражный способ разработки, которым могут обрабатываться континентальные россыпи, а также техногенные накопления алмазного сырья, золота, платины и других полезных ископаемых [1].

Дражная разработка месторождений подразумевает использование специальных котлованов. Их формирование происходит путём строительства насыпных гидротехнических сооружений (дамб) по периметру разрабатываемого участка. Главными функциями котлованов является обеспечение обводнения месторождения и поддержание необходимого для функционирования драги уровня техногенных вод.

Технология разработки и обогащения полезных ископаемых дражным способом неразрывно связана с использованием большого объема воды. В процессе работ происходит физическое и химическое загрязнение техногенных вод. Физическое загрязнение связано с образованием тонкодисперсных твердых частиц при дезинтеграции пород на промывочных станках с целью отделения минеральных частиц и зерен полезного ископаемого [1]. Химическое загрязнение – это результат растворения токсичных химических веществ в бассейне котлована. Кроме того, с промышленными водами в реки могут попадать горюче-смазочные материалы и нефтепродукты, используемые при эксплуатации оборудования. По этой причине, одним из главных направлений по охране водных источников от загрязнения при разработке россыпей является обеспечение локализации технологических стоков от естественного водотока [2].

Локализация техногенных вод внутри дражных котлованов напрямую зависит от технического состояния эксплуатируемых на месторождении гидротехнических сооружений. В связи с этим, приобретают актуальность

исследования, направленные на определение физического состояния техногенных грунтов, слагающих основания дамб.

Для получения необходимой информации целесообразно применять геофизические методы неразрушающего контроля, в частности, метод электротомографии. Основопологающим фактором применения именно этого метода является значительная дифференциация грунтов исследуемого объекта по параметру удельного электрического сопротивления (УЭС). Измерение параметра УЭС позволяет с высокой точностью картировать зоны фильтрации техногенных вод сквозь основания дамб.

Таким образом, целью исследования является диагностика состояния оснований дамб дражного котлована с помощью электротомографии. Основные задачи исследования заключаются в поиске фильтрационных потоков техногенных вод, а также картировании участков обводненных грунтов.

**Объект исследования.** Россыпное месторождение алмазов «Горное» расположено в Западно-Якутской алмазоносной провинции. Административно территория входит в состав Мирнинского района Республики Саха (Якутия) с центром управления в г. Мирный. Разработку месторождения осуществляют структурные подразделения Мирнинского ГОКа. Месторождение расположено в русловой и террасовых зонах долины р. Ирелях. Измерения выполнялись на гидротехнических сооружениях (дамбах) предназначенных для создания технологического дражного водоёма (котлована № 6). Схема расположения геофизических профилей и общий вид котлована представлены на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема расположения геофизических профилей на дамбах котлована № 6 (спутниковый снимок)

Дамбы котлована являются гидротехническими сооружениями IV класса, по типу каменно-земляные, насыпные, максимальная высота – 12 м, ширина – 10 м.

**Методика исследования.** Для решения поставленных задач применяется методика сплошных электрических зондирований (электротомография). В качестве измерительной аппаратуры используется электроразведочная станция «Скала-64». Методика исследований основана на изучении распределения поля постоянного электрического тока от источника с известными параметрами в проводящей геологической среде. Для создания поля и измерения его напряжённости используется совокупность электродов А-М-Н-В, в которой электроды А-В являются питающими (на них подается ток), а электроды М-Н – измерительными (между ними производится замер напряжённости электрического поля). На рисунке 2 представлена принципиальная схема измерений методом электротомографии.



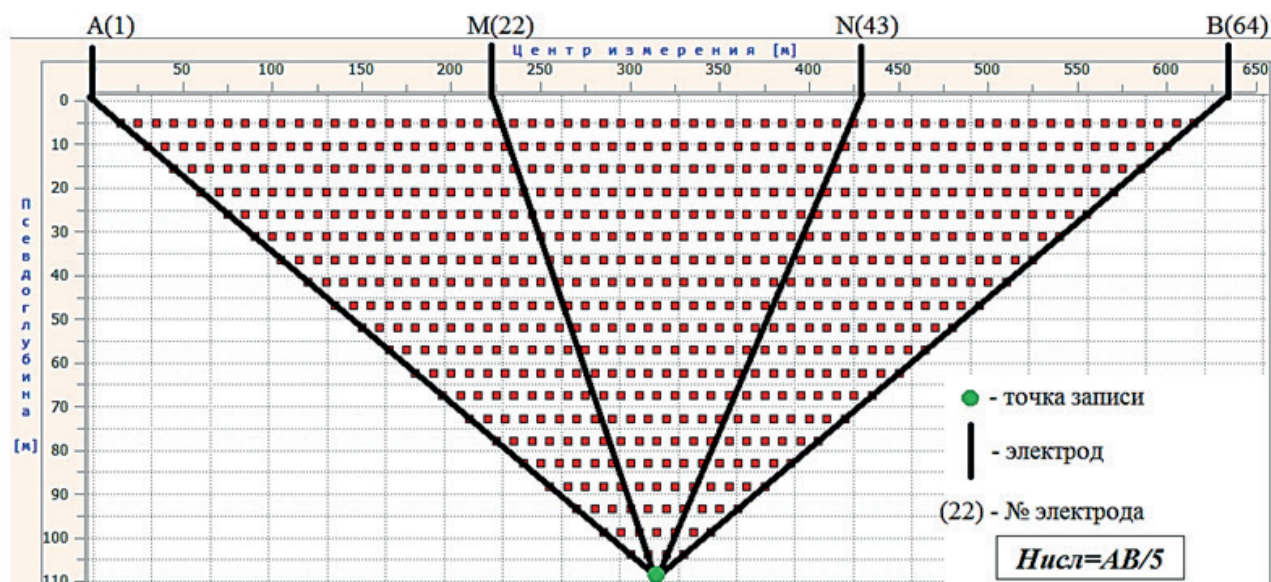


Рисунок 2. Схема измерений методом электротомографии (рабочее окно «СКАЛА-64»)

Измеренные ток и разность потенциалов позволяют рассчитать кажущееся удельное электрическое сопротивление ( $\rho_{каж.}$ , Ом·м) – электрическое поле, нормированное по параметрам установки таким образом, чтобы в однородном полупространстве кажущееся сопротивление совпадало с истинным удельным сопротивлением [3].

Первичная камеральная обработка данных, полученных при полевых работах, выполняется в программе «RiPPP». Для двухмерной интерпретации профильных данных электротомографии используется программа «ZondRes2D». При помощи «ZondRes2D» решаются прямая и обратная задачи электротомографии. Обратная задача (инверсия) позволяет из измеренных значений разности потенциалов получить двумерное распределение удельных сопротивлений [4]. В качестве входных данных для этого используются координаты электродов, высоты, измеренные значения разности потенциалов и дисперсии измерений, обработанные в программе «RiPPP». Таким образом, основываясь только на измерениях с дневной поверхности, рассчитываются геоэлектрические разрезы исследуемой геологической среды.

**Результаты исследования.** Проведенные измерения и расчёт удельного электрического сопротивления грунтов позволили построить двумерные модели исследуемых объектов (см. рисунок 3).

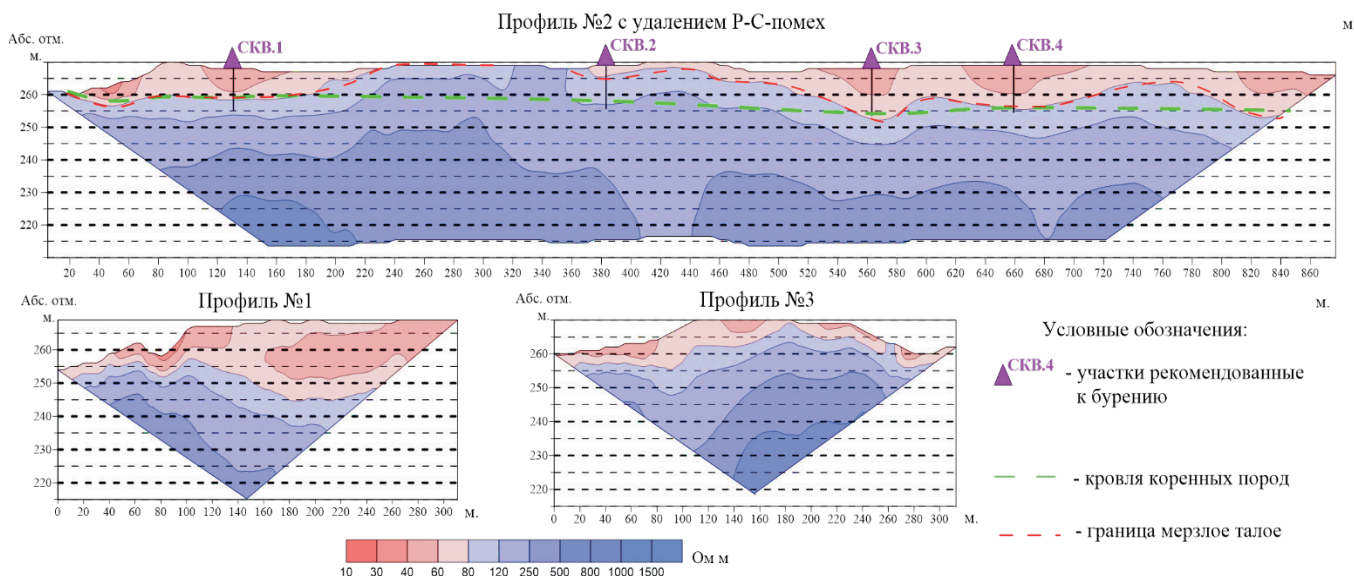


Рисунок 3. Геоэлектрические разрезы исследуемых объектов

Основываясь на полученных данных, можно выделить основные критерии, характеризующие техническое состояние дамб, обозначить кровлю коренных пород и границу перехода талых грунтов в мёрзлые.

Профиль №1 расположен в южной части дамбы, разделяющей котлован № 6 и котлован № 5, протяжённость 310 м (см. рисунок 1). Верхняя часть разреза представлена талыми грунтами мощностью до 20 м. В створе ПК160-ПК300 фиксируется низкоомная зона УЭС 40-60 Ом·м, мощностью 10-15 м, обусловленная термокарстовыми процессами. Подтверждением служит участок профиля ПК160 - ПК180. На данных пикетах визуально наблюдается процесс выноса грунтов основания дамбы с потоками фильтрационных вод (механическая суффозия) из котлована № 6 в котлован № 5 (см. рисунок 4).



Рисунок 4. Механическая суффозия на ПК160 - ПК180 профиля № 1

Профиль №2 расположен по гребню южной дамбы котлована № 6, протяжённость 870 м (см. рисунок 1). Западная часть ПК60-ПК220 представлена талыми грунтами мощностью до 10 м. В нижнем бьефе дамбы на участке ПК110-ПК150 наблюдается выход техногенных вод (см. рисунок 5). УЭС участка составляют 40-60 Ом·м., что свидетельствует о наличии фильтрационного потока. Для подтверждения результатов интерпретации необходима заверка бурением на ПК130.

Участок дамбы в створе ПК240-ПК310-ПК360 представлен грунтами с УЭС 120-250 Ом·м, что свидетельствует о мерзлом состоянии грунтов и отсутствии обводнённых участков.

В нижнем бьефе дамбы в районе ПК370-ПК410 визуально наблюдаются подтёки воды, предположительно связанные с оттайкой насыпных грунтов. Для исключения предположения о наличии фильтрации в теле дамбы рекомендуется заверка аномалии бурением на ПК390.

В створе пикетов ПК540-ПК700 фиксируется низкоомная область мощностью до 15 м, предположительно, эти участки представляют собой массивы водонасыщенных насыпных грунтов, участок рекомендован к заверке бурением на ПК560 и ПК660.





Рисунок 5. Выход фильтрата техногенных вод на ПК130 профиля № 2

Профиль 3 расположен в южной части западной дамбы котлована №6, протяженность 310 м (см. рисунок 1). Верхняя часть разреза представлена тальми грунтами с УЭС 40-60 Ом·м, мощностью до 5 м, зоны фильтрации не наблюдаются, основание находится в мёрзлом состоянии.

По результатам работ и интерпретации измерений, для заверки бурением вынесены 4 участка предрасположенных возникновению зон сквозной фильтрации техногенных вод (см. рисунок 1). Буровые работы по заверке геофизических аномалий на профиле № 2 подтвердили наличие фильтрационного потока на ПК130 (скважина 1) и талых обводнённых грунтов в теле дамбы на ПК370 (скважина 2). Скважины 3 и 4 (ПК560 и ПК660) талых обводнённых грунтов в теле дамбы не вскрыли. Данное расхождение объясняется тем, что геоэлектрический разрез даёт характеристику определённой геологической среды в целом, тогда как данные геологоразведочной скважины характеризуют состояние грунтов в одной конкретной точке. Бассейн котлована № 6 оказывает техногенное воздействие на тело дамбы и коренные породы в пределах ПК540-ПК700, поэтому возникновение участков с пониженными значениями УЭС вполне закономерно.



**Заключение.** Таким образом, представленная методика позволила детально изучить техническое состояние гидротехнических сооружений котлована № 6. Основываясь на результатах исследования, возможна разработка комплекса ремонтно-восстановительных работ, направленных на повышение устойчивости дамб. Для локализации техногенных вод внутри котлована необходимо устранение зон сквозной фильтрации.

Стоит отметить, что применение данного метода диагностики гидротехнических сооружений целесообразно не только на промышленных объектах, но и на плотинах, расположенных в пределах населенных пунктов. Возможность оперативной оценки устойчивости дамб и плотин позволяет предотвратить аварийные ситуации, связанные с нарушением их функционирования (затопление жилых территорий, экологическое загрязнение, экономические потери).

#### **Список литературы:**

1. Нафиков Р.З., Кисляков В.Е., Катышев П.В. Дrajная разработка россыпей: учебное пособие / Москва: Знание-М, 2024. – 294 с.
2. Кивляков В.Е., Нафиков Р.З. Технология дражной разработки россыпных месторождений крайнего севера / Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. Вып.1, С. 160 – 166.
3. Инструкция по эксплуатации многоэлектродной электроразведочной станции «СКАЛА-64» / ООО «КБ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ». – Новосибирск, 2015. – 43 с.
4. Руководство пользователя ZondRes2D. / «Zond software» – Санкт-Петербург, 2014. – 67 с.

- Балашов Н.М., 6  
Брегеда А.И., 12  
Вазиева И.А., 20  
Валиуллин И.Р., 22  
Гаврилов Д.С., 37  
Григорьев А.Н., 88  
Грядобитов В.С., 26  
Данилов Н.Е., 37  
Исупова А.А., 43  
Карелина О.А., 53  
Кушнир О.С., 60  
Кушнир П.О., 60  
Латыпов А.А., 66  
Лебедев С.Н., 66, 106  
Липатов А.Н., 12  
Лубенченко Н.А., 88  
Майер А.Е., 6  
Макеева И.Р., 138  
Милицина Т.С., 22  
Минаев А.С., 97  
Михайлов А.Ф., 100  
Мустафин А.М., 106  
Овечкин А.А., 66  
Пыхов В.В., 115  
Степанов И.Ю., 122  
Столбиков А.А., 129  
Теплых Н.А., 43  
Тютюник А.М., 136  
Файрушина Л.Р., 138  
Шульгин А.Н., 60  
Юсупов Ю.Ф., 141  
Ярушин К. М., 146



Статьи сборника публикуются в авторской редакции

Подписано в печать 31.08.2024. Формат 60x84 1/16  
Печ. л. 10,5 Тираж 100 экз.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Каширское ш., 31.  
Издательско-полиграфический отдел СФТИ НИЯУ МИФИ  
456776, Снежинск, Комсомольская, 8