

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа **Инженерная школа ядерных технологий**  
Направление подготовки **14.04.02 «Ядерная физика и технологии»**  
Отделения **Отделение ядерно-топливного цикла**

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Математическое моделирование нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг

УДК 539.163:546.289:621.039.33::519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ71	Шинкевич Роман Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов А.А.	д.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Е.В.	к.филос.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОЯТЦ	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Профессиональные компетенции</b>	
Р1	Способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, в соответствии с целями магистерской подготовки.
Р2	Способностью применять экспериментальные, теоретические и компьютерные методы исследований в профессиональной области.
Р3	Способность самостоятельно выполнять экспериментальные или теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современной техники и методов расчета и исследования.
Р4	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов
Р5	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
Р6	Готовность решать инженерно-физические и экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.
Р7	Способность эксплуатировать, проводить испытания и ремонт современных физических установок.
Р8	Готовность к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов
Р9	Способность разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности на предприятии; осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии.
Р10	Готовность к кооперации с коллегами и работе в коллективе, к организации работы коллективов исполнителей.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа ядерных технологий  
14.04.02 «Ядерные физика и технологии»  
Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ОЯТЦ ИЯТШ  
\_\_\_\_\_ А.Г. Горюнов

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ71	Шинкевич Роман Алексеевич

Тема работы:

Математическое моделирование нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг
---

Утверждена приказом директора	№ 1538/с от 27.02.2019
-------------------------------	------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Задание. Литературные источники по теории разделения многокомпонентных изотопных смесей, подходам к математическому моделированию нестационарного разделения многокомпонентных изотопных смесей в каскаде газовых центрифуг, физико-химическим свойствам Ge и областям применения его изотопов.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Обзор литературы.</li><li>2. Описание математической модели нестационарного процесса разделения многокомпонентных изотопных смесей в каскаде газовых центрифуг и алгоритма расчета системы дифференциальных уравнений.</li><li>3. Результаты численного исследования процесса нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг.</li><li>4. Экономический расчет.</li><li>5. Охрана труда и техника безопасности.</li><li>6. Выводы. Заключение.</li></ol>

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
<b>Описание объекта исследований</b>	Орлов А.А., профессор ОЯТЦ, д.т.н.
Каскад постоянной ширины для разделения многокомпонентных изотопных смесей, состоящий из газовых центрифуг.	
Анализ полученных данных	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Латышева Е.В., доцент ОСГН, к.филос.н.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С., ассистент ОЯТЦ, к.ф.-м.н.
Часть на иностранном языке	Новоселов И.Ю., ассистент ОЯТЦ.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b>	
Mathematical model of nonstationary separation processes proceeding in the cascade of gas centrifuges in the process of separation of multicomponent isotope mixtures / Математическое моделирование нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	27.02.2019 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов А.А.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ71	Шинкевич Роман Алексеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Шинкевич Роман Алексеевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Изотопные технологии и материалы

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость электроэнергии определяется из средней по г.Томск. Стоимость материальных принадлежностей определяется из средней стоимости по г.Томск
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 27, 1 % для образовательных учреждений

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	Матрица ответственности
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет</i>	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта Бюджет НИР
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	4.03.2019
--	-----------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Е.В.	к.филос.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Шинкевич Роман Алексеевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Шинкевич Роман Алексеевич

Школа	ИЯТШ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ.</li> </ul>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	25.03.2019
---	------------

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.	25.03.2019	

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Шинкевич Роман Алексеевич		

## Реферат

Магистерская диссертация содержит 106 с., 12 рисунков, 21 таблицу, 102 источника.

Ключевые слова: центрифуга, многокомпонентная изотопная смесь, изотопы германия, математическое моделирование, каскад.

Объектом исследования является каскад постоянной ширины для разделения многокомпонентных изотопных смесей, состоящий из газовых центрифуг.

Цель работы – численное исследование закономерностей нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг.

В процессе исследования проводилось численное моделирование нестационарного процесса разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг постоянной ширины при его заполнении рабочим веществом, и определялась динамика концентрации его изотопов в потоках легкой и тяжелой фракций каскада.

В результате исследования показано, что в процессе заполнения происходит разделение изотопов германия. После заполнения каскада изотопы германия распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов германия имеет место на конечных ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания. Результаты численного моделирования разделения изотопов германия хорошо согласуются с данными других авторов для случая, когда гидравлические параметры каскада соответствуют стационарным (состояние 1). Характер изменения концентрации изотопов германия в ходе нестационарного процесса зависит от начального состояния каскада. Длительность нестационарного процесса в случае расчета из начального состояния 2 меньше, чем при расчете из начального состояния 1.

Выявленные закономерности нестационарного разделения изотопов германия внесут вклад в развитие теории разделения многокомпонентных изотопных смесей и могут быть использованы при оптимизации режима разделения этих изотопов в АО «ПО ЭХЗ», г. Зеленогорск.

Экономическая эффективность значимость работы: составлен календарный план НИР, рассчитана смета и общая сумма затрат на проведение НИР. Оценка научно-технического эффекта НИР равна 9.



## Сокращения и обозначения

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ДИС – двухкомпонентная изотопная смесь;

МИС – многокомпонентная изотопная смесь;

КПШ – каскад постоянной ширины;

ПСК – прямоугольно-секционированный каскад;

ГЦ – газовая центрифуга;

МКК – межкаскадные коммуникации;

GERDA – germanium detector array;

АО «ПО ЭХЗ» – Акционерное общество «Производственное объединение  
Электрохимический завод».

## Содержание

Введение	12
1. Развитие теории и подходы к математическому моделированию разделения двух и многокомпонентных изотопных смесей	13
1.1. Развитие общей теории разделения изотопов	13
1.2. Развитие теории нестационарных процессов в каскадах	17
1.2.1. Развитие теории нестационарных гидравлических процессов	17
1.2.2. Развитие теории нестационарных разделительных процессов	21
1.3. Физико-химические свойства германия и перспективы применения его изотопов	26
2. Описание математической модели нестационарных гидравлических и разделительных процессов	30
2.1. Основные параметры ступени и каскада	30
2.2. Объемы, входящие в модель	33
2.3. Основные уравнения, описывающие нестационарные процессы	34
2.4. Алгоритм решения уравнений нестационарной гидравлики и разделения	35
2.5. Результаты численного моделирования	37
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	41
3.1. Потенциальные потребители результатов исследования	42
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений	43
3.1.2 Анализ внутренней и внешней среды	46
3.2 Планирование управления научно-техническим проектом	49
3.2.1 Иерархическая структура работ проекта	49
3.2.2 Контрольные события проекта	50
3.2.3 План проекта	51
3.3 Бюджет научного исследования	54
3.3.1 Расчет материальных затрат	54

3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы	55
3.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды	57
3.3.4 Накладные расходы	57
3.3.5 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта	58
3.4 Организационная структура проекта	58
3.5 Матрица ответственности	59
3.6 Оценка научно-технического эффекта	61
4. Охрана труда и техника безопасности	65
4.1. Введение	65
4.2. Характеристика вредных и опасных факторов	66
4.3. Обоснование и разработка мероприятия по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	67
4.3.1. Организационные мероприятия	67
4.3.2. Технические мероприятия	68
4.4. Условия безопасной работы с ПЭВМ	70
4.5. Электробезопасность	72
4.6. Пожарная безопасность	74
Выводы. Заключение	77
Список используемых источников	78
Приложение А	89

## Введение

Работа каскада ГЦ для разделения МИС сопровождается нестационарными гидравлическими процессами. С этими процессами связано изменение величин давлений и потоков рабочего вещества в ступенях каскадов и выходящих потоках. В ходе нестационарного разделительного процесса в ступенях и потоках каскадов изменяется изотопный состав рабочего вещества. Изменение величин потоков каскада (питания, потоков легкой и тяжелой фракции) являются одной из частых причин появления нестационарных процессов является. За время протекания процесс изменяется величина потоков, давлений рабочего вещества и концентраций компонентов внутри каскада. Изучение такого нестационарного процесса обусловлено прежде всего определением закономерностей изменения концентраций в каскаде и выходящих потоках.

Так как экспериментальный подход для решения данной задачи затратный, целесообразным является изучение нестационарных процессов с помощью математического моделирования.

## 1. Развитие теории и подходы к математическому моделированию разделения двух и многокомпонентных изотопных смесей

### 1.1 Развитие общей теории разделения изотопов

Проектирование и эксплуатация экономически эффективных каскадов предполагает проведение комплекса исследований методами математического моделирования. Теория разделения в каскадах позволяет, не прибегая к сложным и дорогим физическим экспериментам, выявить основные закономерности процесса разделения, дать рекомендации по практической реализации каскадных установок, оптимизировать режимы их работы.

Общая теория разделения изотопов изучает основные принципы построения каскадов независимо от применяемого метода разделения и извлекаемого изотопа. Она позволяет определить расчетным путем количества ступеней, которое необходимо для разделения изотопной смеси на фракции с заданным изотопным составом, а также рассчитать параметры каждой ступени. Теория разделения изотопов построена на решении уравнений, которые выводятся из системы уравнений материального баланса вещества и компонентов с учетом соотношений, определяющих разделительные характеристики ступеней.

В зависимости от числа компонентов изотопной смеси теория разделения подразделяется на теорию каскадов для разделения ДИС и МИС. В свою очередь в зависимости от обогащения в разделительном элементе, каждая из теорий может быть развита для случая слабых и произвольных обогащений.

Основные положения теории разделения ДИС изложены в работе [1]. Введены понятия разделительный потенциал, разделительная способность (мощность), которые используются для оценки количества разделительных элементов в каскаде, необходимых для получения заданной работы разделения, а также в задачах оптимизации каскадов и оценки

эффективности их работы. В работе [2] представлены методики расчета каскадов с симметричным и несимметричным соединением ступеней, в работе [3] приведены результаты исследований по оптимизации стационарного режима эксплуатации каскадов.

В теории разделения МИС значительное число работ [4–13] посвящено так называемым модельным каскадам (например, R-каскад, Q-каскад, квазиидеальный каскад). Теория модельных каскадов позволяет аналитически определить количество ступеней, величины потоков каскада для получения заданных концентраций целевого компонента из исходной смеси определенного изотопного состава. Модельные каскады используются для расчета и оптимизации параметров каскадов постоянной ширины (КПШ) и прямоугольно-секционированных каскадов (ПСК). В работе [4] введен критерий оптимальности каскада по величине суммарного потока. Методики расчета разделения МИС в КПШ и ПСК при симметричном соединении ступеней приведены в работах [14–18]. Результаты теоретических исследований каскадов с противоточно-несимметричным соединением ступеней для разделения МИС и численные методы расчета каскадов, ступени которых состоят из разделительных элементов с двумя выходящими потоками описаны в работах [19–21]. В работах [22–24] приведены основы теории многопоточных разделительных элементов (с тремя и более выходящими потоками), соединение которых различными способами позволяет добиться уменьшения величины суммарного потока каскада и повышения эффективности его работы. Однако теория многопоточных разделительных элементов и каскадов на их основе не получила широкого практического применения.

Особое внимание в теории разделения МИС уделено понятиям потенциала разделения и разделительной способности [25–33]. Предлагались разные формулировки потенциала разделения МИС [25–32]. Однако они носят частный характер и не позволяют ввести универсальное понятие потенциала разделения МИС [33]. Разделительная способность,

рассчитываемая с помощью потенциалов разделения [25–33], не удовлетворяет основополагающему требованию – инвариантности разделительной способности по отношению к составу МИС. В результате этого возникают затруднения в определении единой меры разделения, в сравнении разделительной способности различных устройств, что приводит к невозможности оценки числа разделительных элементов, необходимых для получения заданной работы разделения.

В работе [27] для разделительной способности элемента предложено следующее выражение:

$$\delta U = \frac{1}{2} g \theta (1 - \theta) \epsilon_0^2, \quad (1.1)$$

где  $\delta U$  – разделительная способность элемента, кг/с;  $g$  – поток, поступающий в элемент, кг/с;  $\theta$  – коэффициент деления потока;  $\epsilon_0$  – коэффициент обогащения, приходящийся на единицу разности массовых чисел компонентов.

Особым случаем в теории разделения МИС является разработка способов получения промежуточного по массовому числу компонента. Непрерывный процесс разделения МИС в каскаде с тремя потоками (питание, легкая фракция, тяжелая фракция), характеризующийся постоянными во времени величинами этих потоков и концентрациями компонентов в них, называется разделительным этапом. Компоненты с наименьшим и наибольшим массовым числом могут быть получены с концентрациями близкими к 100%. Повышение концентрации промежуточного по массовому числу компонента в течение одного разделительного этапа в потоке легкой или тяжелой фракции каскада ограничено некоторой предельной величиной [34]. Она не зависит от параметров каскада (величины потоков, количества ступеней и их разделительных характеристик) и определяется только исходным составом МИС, подаваемой в каскад.

В работе [25] предложен способ получения промежуточного

компонента высокой концентрации в каскаде с дополнительным выходящим потоком, основанный на том, что распределение концентраций промежуточного компонента имеет максимальное значение в средней части каскада. Организация дополнительного выходящего потока из ступени в средней части каскада (рисунок 1.1) позволяет получать промежуточный компонент с более высокой концентрацией [34].



Рисунок 1.1 – Каскад с дополнительным выходящим потоком

В работах [10–13, 35–38] рассмотрено разделение МИС в каскаде с одним или несколькими дополнительными выходящими потоками. Для реализации такого способа дополнительный поток должен отбираться из любой ступени, что увеличит затраты на создание каскада. Производительность данного способа остается низкой, так как величина дополнительного потока может быть в несколько раз меньше величины потока питания каскада. В такой каскад также может подаваться несколько потоков питания [39–42].

Для получения промежуточного компонента высокой концентрации предложено проводить многоэтапный процесс разделения в каскаде с тремя потоками (питание, легкая и тяжелая фракции) [43, 44–47]. Разделение МИС происходит последовательно в несколько разделительных этапов. Изотопная смесь, полученная в потоке легкой или тяжелой фракции каскада, является питанием для следующего разделительного этапа. Преимуществами данного способа являются возможность получения любого компонента с концентрацией близкой к 100%, высокая степень извлечения компонента и



минимальный расход исходного сырья. Недостатком данного способа в случае, когда разделительные этапы реализуются последовательно на одном и том же каскаде, является необходимость проведения переходного процесса между разделительными этапами. В течение переходного процесса рабочее вещество откачивается из каскада в сбросную установку, вносятся изменения в настройки каскада, затем каскад повторно заполняется рабочим веществом и постепенно устанавливаются стационарные величины потоков каскада и концентрации компонентов в них.

Таким образом, можно констатировать, что к настоящему времени теория разделения ДИС получила большее развитие по сравнению с теорией разделения МИС, в которой остается открытым вопрос о понятии потенциала разделения. В ходе развития теории разделения МИС усовершенствованы методики расчета каскадов и разработаны способы получения компонентов высокой концентрации.

## 1.2 Развитие теории нестационарных процессов в каскадах

### 1.2.1. Развитие теории нестационарных гидравлических процессов

В стационарном режиме работы каскаде ГЦ происходит непрерывное Разделение изотопных смесей. В результате изменения параметров эксплуатации каскадов ГЦ возникают нестационарные гидравлические процессы, приводящие к нарушениям режима работы ступеней каскада, технических условий его эксплуатации и перегрузкам оборудования. Нестационарные гидравлические процессы являются причиной возникновения нестационарных разделительных процессов и влияют на эффективность работы каскада ГЦ.

В ходе нестационарных процессов происходит изменение концентраций изотопов в ступенях, и каскад производит продукт с концентрацией целевого изотопа, не соответствующей требуемому значению. В результате этого каскад некоторое время расходует исходное

сырье, нарабатывая «некачественный» продукт. Актуальность изучения нестационарных процессов вызвана необходимостью обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования.

В отличие от газодиффузионных влияние центрифужных каскадов на эффективность работы выше благодаря меньшей инерционности и меньшему газосодержанию.

В связи с выше сказанным, проведение исследований влияния нестационарных процессов на эффективность работы каскадов ГЦ для разделения МИС является весьма актуальным. Для решения этой задачи применяется математическое ввиду больших финансовых и временных затрат экспериментального подхода.

Исследование нестационарных процессов в каскадах началось с момента создания каскадов для разделения ДИС в связи с вопросами их динамической устойчивости. Теория динамической устойчивости каскадов ГЦ основывается на следующих допущениях:

1. Газосодержание ступени сосредоточено в одном (нескольких) объемах.
2. Давление характеризует состояние газа в каждом объеме, а газодинамические процессы при этом не рассматриваются.
3. Величина отклонения потоков и давлений от начального расчетного значения мала.
4. Ступени каскада считают идентичными.

Разработаны аналитические методы решения систем дифференциально-разностных уравнений, описывающих нестационарные процессы в каскадах ГЦ. Однако они могут быть использованы только для некоторых частных случаев (например, для изменения потока легкой фракции каскада).

Теория нестационарных гидравлических процессов в каскадах для разделения ДИС получила дальнейшее развитие в математических моделях [48–55] благодаря использованию численных методов. Эти модели

отличаются друг от друга количеством выделяемых объемов ступени. Сначала газосодержание ступени считалось сосредоточенным в одном объеме. Затем использовалась трехобъемная модель (в качестве выделенных объемов выступают роторы ГЦ, секционные коммуникации и коммуникации ступени). В работе [48] в составе ступени выделены секции, каждая из которых состоит из 3 объемов (роторы ГЦ, коллекторы питания и легкой фракции). Математическая модель, описанная в работах [49–51], дополнена линиями межкаскадных коммуникаций (МКК) с газосодержанием, сосредоточенными в нескольких объемах, число которых определяется компоновкой и комплектацией оборудования. В математической модели [52–54] дополнительно учтены объемы коллекторов тяжелой фракции каждой секции и объемы байпасных коммуникаций ступени. Дифференциальные уравнения, описывающие нестационарные гидравлические процессы, в моделях [48–54] решались различными численными методами: явным методом Эйлера, неявным методом Эйлера-Коши совместно с линеаризацией приращений функций, методом Эйлера с пересчетом [55].

С использованием математических моделей [48–54] проведены расчеты параметров каскада ГЦ для разделения ДИС в ходе нестационарных гидравлических процессов, вызванных отключением электропитания ГЦ, потоков каскада, переносом точки подачи потока питания, изменением загрузки ступеней, остановкой подкачивающих компрессоров в ступенях каскада и отборных линиях МКК. На основе математической модели [52–54] разработан компьютерный тренажер, с помощью которого можно проводить обучение производственного персонала действиям в штатных и аварийных ситуациях.

Каскады для разделения МИС имеют намного меньше количество ГЦ, чем каскады для разделения ДИС. Также эти каскады отличаются регулирующими устройствами, расположенные в межступенных коммуникациях. Исследование нестационарных гидравлических процессов в каскадах для разделения МИС проводилось с помощью математической

модели, в основу которой легло положение о независимости отношения давления на входе в отборник тяжелой фракции ГЦ  $P_T$  к давлению на входе в отборник легкой фракции ГЦ  $P_L$  от их абсолютных значений для данного типа ГЦ и рабочего вещества с молярной массой  $\mu$ :

$$\frac{P_T}{P_L} = \frac{P'_T}{P'_L} \left[ 1 + \frac{\mu \omega}{2RTg} (Y_T r_T - Y_L r_L) \right], \quad (1.2)$$

$$Y_{T,L} = \frac{r_a^2}{[r_{T,L}(r_a^2 - r_0^2)]^2} \left[ r_a^2 r_{T,L}^2 - 4r_0^2 r_a^2 \ln\left(\frac{r_{T,L}}{r_0}\right) - \frac{r_0^4 r_a^2}{r_{T,L}^2} \right], \quad (1.3)$$

где  $r_0$  – радиус трубки ввода потока питания в ротор ГЦ;  $P'_T$ ,  $P'_L$  – давление на радиусе  $r_0$  в местах крепления отборников;  $r_{T,L}$  – радиус вылета отборника тяжелой и легкой фракции ГЦ;  $r_a$  – внутренний радиус ротора ГЦ.

Ступень каскада представлена в этой модели в виде одного объема. Дифференциальное уравнение, описывающее нестационарный гидравлический процесс в выделенном объеме, решено при помощи явной разностной схемы Эйлера [55]. Проведены расчеты параметров каскада ГЦ в ходе нестационарных гидравлических процессов при заполнении каскада рабочим веществом, изменении величин внешних потоков, переносе точки подачи потока питания и изменении сопротивления регулирующих устройств в ступенях. Недостатком однообъемной модели является упрощенное представление ступени в виде одного объема. Как показывает история развития моделей нестационарных гидравлических процессов в каскаде для разделения ДИС, чем больше объемов выделяется в составе ступени и каскада, тем выше сходимость расчетных и экспериментальных данных. Использование явного метода Эйлера для решения дифференциальных уравнений, описывающих нестационарные гидравлические процессы в этой модели, является причиной низкой скорости проведения расчетов.

Из сказанного выше следует, что получить аналитические решения, описывающие нестационарные гидравлические процессы в каскаде ГЦ, достаточно сложно либо невозможно. Математическое моделирование

разделения ДИС в каскаде ГЦ развивалось по пути увеличения числа объемов, в которых сосредоточено газосодержание каскада, что повышало точность моделирования. Известная модель нестационарных гидравлических процессов в каскаде ГЦ для разделения МИС основана на однообъемном представлении ступени, что является причиной низкой сходимости расчетных и экспериментальных данных и имеет низкую скорость счета.

### 1.2.2 Развитие теории нестационарных разделительных процессов

Причиной изменения концентрации компонентов в ступенях и потоках каскада могут быть не только разделительные процессы, но и состав МИС в потоке питания каскада.

Теория нестационарных разделительных процессов в каскаде для разделения ДИС основана на уравнениях обогащения, выведенных в работе [1] из уравнений материального баланса по веществу и компонентам. Ниже приведена система дифференциальных уравнений этой модели каскада [1], описывающая нестационарные разделительные процессы при изменяющихся во времени гидравлических параметрах каскада:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} G_F(n,t) \left[ -\frac{\partial}{\partial n} C(n,t) + 2\varepsilon C(n,t) \cdot (1 - C(n,t)) \right] = \tau_n(n,t) - C(n,t)\tau(n,t) \\ \frac{\partial}{\partial n} \tau(n,t) = -\frac{\partial}{\partial n} H(n,t) \\ \frac{\partial}{\partial n} \tau_n(n,t) = -\frac{\partial}{\partial n} [H(n,t)C(n,t)] \end{cases}, \quad (1.4)$$

где  $G_F$  – поток питания ступени, кг/с;  $C$  – концентрация компонента;  $\varepsilon$  – коэффициент обогащения;  $\tau$  – поток рабочего вещества в сечении  $n$ , кг/с;  $\tau_n$  – перенос легкого компонента, кг/с;  $H$  – газосодержание, кг.

Авторами [1] показано, что получить аналитическое решение уравнения (1.4) при различных нестационарных возмущениях невозможно. Экспериментально установлено, что для молекулярно-кинетических и

физико-химических методов разделения (например, дистилляция, химический обмен, газоцентрифужный метод) продолжительность установления концентрационного равновесия на несколько порядков превышает продолжительность нестационарного гидравлического процесса, то есть концентрационные изменения могут рассматриваться при постоянных во времени гидравлических параметрах каскада  $G_F$  и  $H$ . В этом случае система уравнений (1.4) заменяется дифференциальным уравнением в частных производных:

$$H \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial n} \tau_{\text{н}}(n, t), \quad (1.5)$$

$$\tau_{\text{н}}(n, t) = \frac{G_F(n)}{2} \left[ \varepsilon C(n, t)(1 - C(n, t)) - \frac{\partial C(n, t)}{\partial n} \right] + \tau(n)C(n, t). \quad (1.6)$$

К настоящему времени аналитическое решение уравнения (1.5) в общем виде не получено. В работе [1] с помощью преобразований Лапласа [56] получено решение уравнения (1.5) для двух частных случаев (работа каскада без регенеративной части и в безотборно-безотвальном режиме), которые редко реализуются на практике при эксплуатации реальных каскадов.

В работе [57] уравнение (1.5) преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений по времени, которая решается «системным» численным методом [35]. С использованием этой модели [57] проведено изучение процесса переноса целевого компонента по каскаду, определено время его накопления на концевой ступени каскада и показано, что профиль каскада влияет на время установления стационарных значений концентраций. У моделей [1, 57] ограниченная область применения, что и является недостатком этих моделей.

В работах [50, 58–59] нестационарные разделительные процессы были рассмотрены совместно с нестационарными гидравлическими процессами. Такой опыт дал дальнейшее развитие теории расчета и моделирования нестационарных разделительных. Для моделирования нестационарных

гидравлических процессов в ступени выделены секции, каждая из которых состоит из объема роторов ГЦ, объема коллектора питания и объема коллектора легкой фракции. Нестационарные разделительные процессы рассмотрены упрощенно в одно объемном представлении ступени. Дифференциальные уравнения нестационарного разделения, как и уравнения нестационарной гидравлики, решались заменой разностным отношением по неявной схеме Эйлера-Коши [55]. Исследования нестационарных гидравлических и разделительных процессов в каскадах для разделения ДИС, возникающих при отключении электропитания, потоков каскада, изменении загрузки оборудования и нарушениях в линиях МКК, были проведены с использованием математических моделей [51, 61–62],

В случае разделения МИС нестационарный разделительный процесс при постоянных гидравлических параметрах каскада описывается уравнением [43, 60–64]:

$$\begin{cases} H(n) \frac{\partial C_j(n,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial n} J_j(n,t), & j = \overline{1; m} \\ \sum_{j=1}^m C_j = 1 \end{cases}, \quad (1.7)$$

$$J_j(n,t) = \frac{G_F(n)}{2} \left( C_j(n,t) \cdot \sum_{l=1}^m \varepsilon_{jl} C_l(n,t) - \frac{\partial C_j(n,t)}{\partial n} \right) + \tau(n) C_j(n,t), \quad (1.8)$$

где  $j, l$  – индекс компонента;  $m$  – количество компонентов в составе МИС;  $C_j$  – концентрация  $j$ -го компонента;  $J_j$  – перенос  $j$ -го компонента;  $\varepsilon_{jl}$  – коэффициенты обогащения  $j$ -го и  $l$ -го компонентов.

К настоящему времени аналитическое решение уравнения (1.7) в общем виде не получено. Однако решение данных уравнений можно получить численными методами. Авторами работы [60] произведена замена системы дифференциальных уравнений в частных производных на систему обыкновенных дифференциальных уравнений, которая была впоследствии решена с помощью метода Рунге-Кутты [55]. Для получения устойчивого решения в работе [60] уменьшается шаг интегрирования, что

увеличивает общее время расчета. Авторами моделей [43, 61–63] применяется численный способ решения дифференциальных уравнений [56]. В модели [65] газосодержание ступени считается сосредоточенным в трех объемах (роторы ГЦ, коллекторы легкой и тяжелой фракций). Исследования [66] показали, что учет газосодержания коллекторов легкой и тяжелой фракций ступени приводит к повышению сходимости расчетных и экспериментальных значений параметров каскада в ходе нестационарных разделительных процессов.

В работах [67, 68] приведена модель нестационарных разделительных процессов в Q-каскаде без регенеративной части. Изучены закономерности изменения концентрации компонентов в потоке легкой фракции Q-каскада.

Из проведенного обзора и анализа литературных данных следует, что использование всех рассмотренных моделей [43, 60–63, 65–68] возможно только для стационарного режима работы каскада ГЦ. Эти модели неприменимы для совместного расчета параметров каскада в ходе нестационарных гидравлических и разделительных процессов. Кроме того, в них использовано допущение, что в начальный момент времени концентрация компонентов во всех ступенях каскада совпадает с их концентрацией в потоке питания.

Совместный расчет параметров нестационарных гидравлических и разделительных процессов в каскаде ГЦ для разделения МИС реализован в еще в одной модели [69], где газосодержание ступени принято сосредоточенным в одном объеме. Расчет изменений концентрации компонентов в  $i$ -ой ступени с учетом изменяющихся гидравлических параметров проводился с использованием уравнения:

$$L_n''^a = L_{n-1}'^a - \sum_{l=n}^N \left[ F_l - P_l - W_l - \sum_i (m_{l,i} + m'_{l,i} + m''_{l,i}) \right], \quad (1.9)$$

где  $F_l$ ,  $P_l$ ,  $W_l$  – потоки питания, отбора и отвала соответственно;  $m_{l,i}$ ,  $m'_{l,i}$ ,  $m''_{l,i}$  – концентрации потоков питания, отбора и отвала соответственно для ступени  $l$ .



Расчет концентрации компонентов в ходе нестационарного процесса проводился по схеме Кларка-Нельсона [69]. Результаты расчетов, полученные с использованием данной модели, имеют существенное расхождение с экспериментальными данными (до 20%) [69].

Таким образом, показано, что существующие математические модели нестационарных разделительных процессов, протекающие в каскаде ГЦ для разделения МИС могут быть использованы только в случае стационарных гидравлических параметров каскада. Недостатками модели нестационарных гидравлических и разделительных процессов является представление ступени в виде одного объема, что является причиной низкой сходимости расчетных и экспериментальных данных, использование линеаризованных уравнений разделения и наличие предельного значения коэффициента обогащения, что ограничивает область ее применения.

Таким образом, проведенный обзор и анализ литературных данных показал, что к настоящему времени достаточно хорошо развита теория разделения ДИС. Активно развивается теория и технология разделения МИС. Для нее разработаны специализированные ГЦ, принципы регулирования каскадов и необходимые регулирующие устройства. При этом остается открытым вопрос о понятии потенциала разделения МИС.

Показана актуальность исследования нестационарных процессов, которые возникают в процессе эксплуатации каскадов ГЦ для разделения МИС с использованием математического моделирования. Из обзора литературных данных следует, что получить аналитические решения, описывающие нестационарные процессы в каскадах ГЦ, достаточно сложно либо невозможно. Математические модели, в которых гидравлические параметры принимаются постоянными, применимы только для моделирования нестационарного разделительного процесса после заполнения каскада рабочим веществом. При этом сходимость расчетных и фактических значений параметров каскада остается низкой. Математические модели нестационарных гидравлических процессов в каскадах для разделения ДИС

развивались по пути увеличения числа объемов, в которых сосредоточено газосодержание каскада. Недостатком математической модели нестационарных гидравлических и разделительных процессов, протекающих в каскадах ГЦ для разделения МИС является представление ступени в виде одного объема, что является причиной низкой сходимости расчетных и экспериментальных данных, а использование линеаризованных уравнений разделения и коэффициента обогащения ограничивает область ее применения.

Учитывая выше сказанное, необходимо создать математическую модель, в которой ступень будет включать несколько выделенных объемов, а параметры нестационарных гидравлических и разделительных процессов будут рассчитываться совместно. С использованием данной модели необходимо установить закономерности влияния нестационарных процессов на работу каскадов ГЦ по разделению МИС.

### 1.3 Физико-химические свойства германия и перспективы применения его изотопов

Химический элемент германий (от латинского слова Germanium), расположенный в IVA группе 4-го периода, имеет 32 атомный номер и атомную массу 72,61. В природе представлен пятью изотопами: 70 (20,84%), 72 (27,54%), 73 (7,73%), 74 (36,28%), 76 (7,61%). Внешний электронный слой  $4s^2p^2$ , степени окисления +4, +2.

Германий – это типичный представитель металлов. Для него характерно наличие серебристого цвета с присущим металлам блеском. Имеется кубическая кристаллическая решетка типа алмаза с периодом 0,357 нм. Плавится при  $938,25^{\circ}\text{C}$ , закипает –  $2850^{\circ}\text{C}$ ; плотность  $5,327\text{ г/см}^3$ . Редкой особенностью германия является увеличение плотности его при плавлении: плотность жидкого германия равна  $5,557\text{ г/см}^3$ .

По химическим свойствам германий похож на кремний. На данный момент германий с кремнием являются фундаментом современной микроэлектроники. Устойчив к парам воды, кислороду и разбавленным кислотам при нормальных условиях.

Ещё одной особенностью германия является прозрачность для инфракрасного излучения с длиной волны более 2 мкм. Использование данной особенности позволило наладить производство стекол, пропускающих инфракрасное излучение [70], сделанное на основе диоксида германия. Вне соединения с кислородом германий уже применяется для нанесения тонких пленок на стёкла, что дополнительно расширило область применения германия радарными установками, датчиками и детекторами.

Изотопы германия в основном используются для производства медицинских радиоизотопов As и Se.  $^{74}\text{Ge}$  используется для производства  $^{74}\text{As}$ ,  $^{76}\text{Ge}$  для производства  $^{77}\text{As}$ ,  $^{74}\text{Ge}$  для производства  $^{73}\text{As}$  и  $^{72}\text{Ge}$  для  $^{72}\text{As}$ .  $^{70}\text{Ge}$ ,  $^{72}\text{Ge}$  и  $^{74}\text{Ge}$  могут быть использованы для производства медицинского радиоизотопа  $^{73}\text{Se}$ , хотя наиболее распространенным способом его получения является природный As ( $^{75}\text{As}$ ). Природный  $\text{GeF}_4$  используется в процессе предварительной аморфизации полупроводников. Наибольший эффект от процесса аморфизации проявляется в случае использования  $^{72}\text{Ge}$  в соединении  $\text{GeF}_4$ .

Кроме того,  $^{76}\text{Ge}$  используется в исследованиях по изучению двойного бета-распада [71].

Возможность двойного бета-распада была обоснована в проекте GERDA, который обеспечил самый низкий уровень радиоактивного фона по сравнению с другими проектами.

Двойной двухнейтринный бета распад – это процесс, в ходе которого образуются два протона, два электрона и два антинейтрино в результате одновременного распада двух нейтронов в ядре. Из частиц, покидающих ядро, могут быть зарегистрированы только электроны. Он наблюдался на

нескольких ядрах, в которых энергетически невыгоден обычный бета распад, в том числе и на  $^{76}\text{Ge}$ .

Исследование двойного безнейтринного бета распада позволит определить природу нейтрино. Существует много проектов, направленных на поиск этого процесса, использующих различные изотопы и методы регистрации. Лидером в данном направлении является проект GERDA, который реализуется европейскими и российскими учеными в Национальной Лаборатории Гран Сассо в Италии. В нем используются детекторы, изготовленные из особо чистого германия, обогащенного по  $^{76}\text{Ge}$ . Германий одновременно является источником и детектором протекания двойного безнейтринного бета распада, поэтому эффективность его регистрации близка к максимально возможной. Экспериментальная установка компактна и использует мало конструкционных материалов, что принципиально важно для обеспечения низкого уровня фона. Высокое разрешение германиевых детекторов и инновационные методики эксперимента обеспечивают подавление естественного радиоактивного фона [72], что очень важно для чувствительности эксперимента, поскольку период полураспада  $0\nu\beta\beta$  во много раз превышает возраст Вселенной.

Детекторы из германия в подземной лаборатории Гран Сассо находятся в криостате объемом  $64 \text{ м}^3$ , заполненном жидким аргоном с температурой  $-190^\circ\text{C}$ , который, в свою очередь помещен в водяной резервуар объемом  $590 \text{ м}^3$ , защищающий установку от космического излучения. Аргон и вода очень чистые и служат дополнительной защиты от радиоактивности. Предусмотрена также возможность регистрации процессов распада, вызванных фоновым излучением. Это позволяет идентифицировать фоновые сигналы в аргоне и воде [72].

Другим перспективным проектом, предназначенный для обнаружения безнейтринного двойного бета-распада, является проект Majorana Demonstrator, который запущен в 2015 году в американской «сверхчистой» лаборатории, находящейся на глубине 1,5 км под землей.

Главная цель запуска Majorana Demonstrator – обнаружить безнейтринный двойной бета-распад в германии-76. Данный вид ядерного распада даст возможность ввести новые понятия в традиционной физике и подтвердить нарушение закона сохранения лептонного числа. Если это произойдет, то подтвердится факт идентичности нейтрино и антинейтрино, а также станет понятно, что результатом «Большого взрыва» стало образование материи в большем количестве, чем антиматерии.

В данном процессе используются детекторы, выполненные из германия обогащенные германием-76 до концентрации не менее 87%. В 2015 году первый модуль установили в цилиндр из свинца и меди, который должен был служить защитной оболочкой. Размещение лаборатории на такой глубине под землей вызвано тем, что во время подобных исследований необходимо избегать каких-либо «фоновых» событий, которые могут быть распознаны, как редкий безнейтринный двойной бета-распад. Majorana Demonstrator должен продемонстрировать, что в подобных лабораториях возможны сверхчувствительные эксперименты, которые будут проводиться в будущем [73].

Главное отличие этих проектов заключается в способе получения «бесфоновых» состояний для проведения эксперимента. Потребность в  $^{76}\text{Ge}$  в проекте GERDA составляет 35 кг, в проекте Majorana Demonstrator – 30 кг. В ближайшие 10 лет потребность в нем будет увеличена до 200 и 1000 кг в проекте GERDA и Majorana Demonstrator соответственно [74].

## 2. Описание математической модели нестационарных гидравлических и разделительных процессов

### 2.1. Основные параметры ступени и каскада

Разделение МИС происходит в каскаде ГЦ. Рабочее вещество содержит  $m$  изотопов (компонентов) с индексом  $i$  ( $i = \overline{1; m}$ ). Каскад ГЦ (рис. 2.1) включает в себя  $K$  ступеней с индексом  $j$  ( $j = \overline{1; K}$ ), которые соединены между собой последовательно по противоточно-симметричной схеме. В ступень каскада с индексом  $K_F$  подается поток внешнего питания  $F$ , на выходе каскада отбираются два потока: легкой  $P$  и тяжелой  $W$  фракции. Поток тяжелой фракции отбирается из первой ступени каскада, а поток легкой фракции из ступени  $K$ .

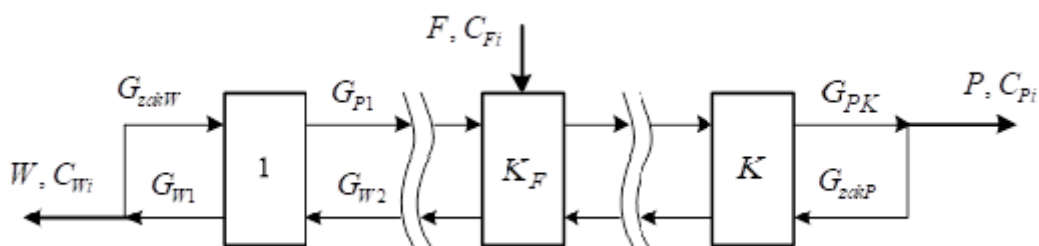


Рисунок 2.1 – Каскад ГЦ для разделения МИС

Считали, что каждая разделительная ступень состоит из  $S$  ГЦ, соединенных между собой параллельно. В нее подается поток питания  $G_{Fi}$ , из ступени (рис. 2.2) отбираются потоки: легкой  $G_{Pj}$  и тяжелой  $G_{Wj}$  фракций. В потоках питания, легкой и тяжелой фракций  $j$ -ой ступени концентрация  $i$ -го изотопа (компонента) обозначена  $C_{Fji}$ ,  $C_{Pji}$  и  $C_{Wji}$ . Кроме того, часть тяжелой фракции, отбираемой с первой ступени может подаваться на питание первой ступени (поток закрутки тяжелой фракции  $G_{zakW}$ ), а часть легкой фракции со ступени  $K$  может подаваться на питание ступени  $K$  (поток закрутки легкой фракции  $G_{zakP}$ ).

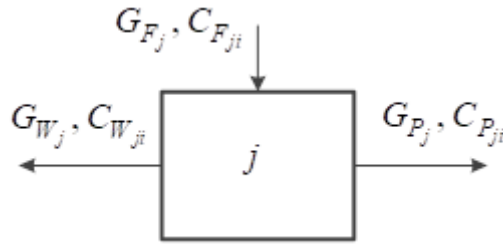


Рисунок 2.2 – Разделительная ступень каскада

Потоки ступеней каскада и концентрации изотопов (компонентов) в этих ступенях в стационарном режиме при условии отсутствия коррозионных потерь рабочего вещества связаны уравнениями материального баланса:

$$G_{Fj} = G_{Pj} + G_{Wj}, \quad (2.1)$$

$$G_{Fj} C_{Fji} = G_{Pj} C_{Pji} + G_{Wj} C_{Wji}, \quad (2.2)$$

Суммарная концентрация всех изотопов (компонентов) каждого потока равна единице.

Поток питания  $j$ -ой ступени  $G_{Fj}$  определяется как

$$G_{Fj} = \begin{cases} \delta_j F + G_{zakW} + G_{Wj+1}, & j = 1 \\ \delta_j F + G_{Pj-1} + G_{Wj+1}, & j = \overline{2; K-1}, \\ \delta_j F + G_{Pj-1} + G_{zakP}, & j = K \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\delta_j = \begin{cases} 1, & j = K_F \\ 0, & j \neq K_F \end{cases}, \quad (2.4)$$

где  $\delta_j$  – признак наличия (отсутствия) внешнего потока питания  $F$  на  $j$ -ой ступени.

В потоке питания  $j$ -ой ступени  $G_{Fj}$  концентрация  $C_{Fji}$  определяется формулами:

$$C_{Fji} = \frac{1}{G_{Fj}} \cdot \begin{cases} \delta_j F C_{Fi} + G_{zakW} C_{Wji} + G_{Wj+1} C_{Wj+1i}, & j = 1 \\ \delta_j F C_{Fi} + G_{Pj-1} C_{Pj-1i} + G_{Wj+1} C_{Wj+1i}, & j = \overline{2; K-1} \\ \delta_j F C_{Fi} + G_{Pj-1} C_{Pj-1i} + G_{zakP} C_{Pji}, & j = K \end{cases}, \quad (2.5)$$

Частоту вращения роторов ГЦ и температурный режим их работы в математической модели считали постоянными.

Разделение изотопов (компонентов) в ступени описывается следующими формулами [75–77]:

$$\chi_{jik} = \frac{C_{Pji} C_{Wjk}}{C_{Pjk} C_{Wji}}, \quad (2.6)$$

$$\chi_{jik} = \chi_{0j}^{M_i - M_k}, \quad (2.7)$$

где  $\chi_{jik}$  – коэффициент разделения  $i$ -го и  $k$ -го изотопа в ступени;  $\chi_{0j}$  – коэффициент разделения на единицу разности массовых чисел;  $M_i, M_k$  – массовые числа  $i$ -го и  $k$ -го изотопа.

Причем  $\chi_{0j}$  зависит от гидравлических параметров ступени.

Потоки каскада ГЦ в стационарном гидравлическом режиме также связаны уравнениями материального баланса:

$$F = P + W, \quad (2.8)$$

$$FC_{Fi} = PC_{Pi} + WC_{Wi}. \quad (2.9)$$

Средневзвешенная концентрация изотопа в  $j$ -ой ступени рассчитывается по формуле:

$$\overline{C}_{ji} = \frac{H_{Fj} C'_{Fji} + H_{Pj} C'_{Pji} + H_{Wj} C'_{Wji} + H'_j C'_{ji}}{H_j}, \quad (2.10)$$

где  $C'_j, C'_{Fj}, C'_{Pj}, C'_{Wj}$  – концентрация  $i$ -го изотопа (компонента) в ГЦ, коллекторах питания, легкой и тяжелой фракции каскада.

Для оценки параметров каскада, имеющего в стационарном режиме одинаковые газосодержание  $H$ , производительность  $G_F$  и коэффициент разделения  $\chi_0$  всех ступеней, используются следующие величины [78]:

$$\tau = \frac{t \ln \chi_0}{\omega}, \quad (2.11)$$

$$\omega = \frac{H}{G_F}, \quad (2.12)$$

где  $\omega$  – постоянная ступени, с;  $H$  – газосодержание ступени, кг;  $\tau$  – безразмерное время.



## 2.2 Объемы, входящие в модель

В основе расчета параметров нестационарных разделительных процессов при разделении МИС лежат следующие положения:

- Все ступени каскада имеют конечное число объемов [79];
- В каждой точке объема температура, давление рабочего вещества и концентрация  $i$ -го компонента одинаковы;
- При расчете параметров каскада по данной модели основными являются два уравнения: баланса и разделения.

Каждый выделенный объем  $V$  ступени каскада характеризуется давлением рабочего вещества  $p$ ; концентрацией  $i$ -го компонента  $C_j$ ; молярной массой  $\mu$ , динамической вязкостью  $\eta$ , температурой  $T$  рабочего вещества; газосодержанием объема  $H$ .

В данной модели газосодержание каждой ступени распределено в 4S объемах: ГЦ ступени, коллектор питания, коллектор легкой фракции и коллектор тяжелой фракции.

Выделенные объемы  $j$ -ой ступени представлены на рис. 2.3.

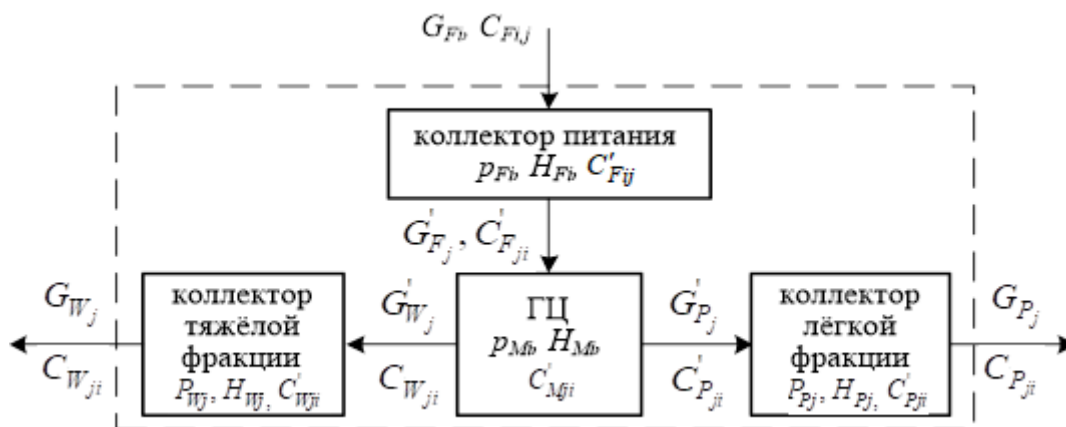


Рисунок 2.3 – Выделенные объемы  $j$ -ой ступени каскада

Поток питания  $G_{Fj}$  с концентрацией  $i$ -го изотопа  $C_{Fji}$  поступает в коллектор питания  $j$ -ой ступени и создает в нем давление  $p_{Fj}$ . Поток легкой фракции  $G'_{Fj}$  с концентрацией  $i$ -го изотопа  $C'_{Fji}$  подается из коллектора питания в ГЦ, где происходит его разделение на потоки легкой  $G'_{Pj}$  и

тяжелой  $G'_{wj}$  фракций с концентрациями  $C'_{Pji}$  и  $C'_{Wji}$ , которые затем поступают в коллекторы легкой и тяжелой фракций, создавая в них давление  $p_{wj}$  и  $p_{Pj}$  соответственно. Из этих коллекторов выходят потоки легкой  $G_{Pj}$  и тяжелой  $G_{Wj}$  фракций  $j$ -ой ступени с концентрациями  $i$ -го компонента  $C_{Pji}$  и  $C_{Wji}$ .

### 2.3 Основные уравнения

Уравнения материального баланса рабочего вещества в выделенных объемах являются основными уравнениями нестационарного гидравлического процесса [79]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dH_{Fj}}{dt} = G_{Fj} - G'_{Fj} \\ \frac{dH_{Mj}}{dt} = G'_{Fj} - G'_{Pj} - G'_{Wj} \\ \frac{dH_{Pj}}{dt} = \begin{cases} G'_{Pj} - G_{Pj}, & j = \overline{1; K-1} \\ G'_{Pj} - P - G_{zakP}, & j = K \end{cases} \\ \frac{dH_{Wj}}{dt} = \begin{cases} G'_{Wj} - W - G_{zakW}, & j = 1 \\ G'_{Wj} - G_{Wj}, & j = \overline{2; K} \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Уравнения материального баланса по веществу и целевому изотопу в выделенных объемах являются основными уравнениями нестационарного разделительного процесса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(H_{Mj}C_{Mji})}{dt} = G'_{Fj}C'_{Fji} - G'_{Pj}C'_{Pji} - G'_{Wj}C'_{Wji} \\ \frac{d(H_{Fj}C'_{Fji})}{dt} = G_{Fj}C_{Fji} - G'_{Fj}C'_{Fji} \\ \frac{d(H_{Wj}C_{Wji})}{dt} = \begin{cases} G'_{Wj}C'_{Wji} - (W + G_{zakW}) \cdot C_{Wji}, & j = 1 \\ G'_{Wj}C'_{Wji} - G_{Wj}C_{Wji}, & j = \overline{2; K} \end{cases} \\ \frac{d(H_{Pj}C_{Pji})}{dt} = \begin{cases} G'_{Pj}C'_{Pji} - G_{Pj}C_{Pji}, & j = \overline{1; K-1} \\ G'_{Pj}C'_{Pji} - (P + G_{zakP}) \cdot C_{Pji}, & j = K \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Расчет параметров нестационарных процессов сводится к решению системы дифференциальных уравнений первого порядка (2.16) и (2.17) с

заданными начальными условиями (давлением рабочего вещества и концентрацией изотопов в начальный момент времени). Величины потоков и газосодержания ступеней, входящие в эти уравнения, являются произвольными функциями по времени, поэтому получить аналитическое решение поставленной задачи невозможно.

#### 2.4. Алгоритм решения уравнений нестационарной гидравлики и разделения

Если рассмотреть некоторый объем с газосодержанием  $H$  и концентрацией  $i$ -ого изотопа  $C_i$ , в который подается суммарный поток  $G_{\text{нач}}$  со средневзвешенной концентрацией  $C_{\text{нач}i}$ , а из объема отбирается суммарный поток  $G_{\text{кон}}$  со средневзвешенной концентрацией  $C_i$ , то дифференциальные уравнения (2.14) можно записать:

$$\frac{dH}{dt} = G_{\text{нач}} - G_{\text{кон}}. \quad (2.15)$$

где  $G_{\text{нач}}$  – входящий в объем поток, кг/с;  $G_{\text{кон}}$  – выходящий из объема поток, кг/с;  $p$  – давление рабочего вещества в объеме, Па.

Решим полученное нелинейное алгебраическое уравнение при известных величинах давлений на предыдущем  $(b-1)$ -ом временном слое  $(t^{(b-1)})$ , и определим величины давлений в момент времени  $t^{(b)}$ . На каждом шаге итерации производится расчет величин давлений и потоков в каждом объеме, начиная с первой ступени до ступени  $K$ . В качестве начального приближения на  $b$ -м временном слое используются величины давлений и потоков на  $(b-1)$ -м временном слое.

После определения давлений и потоков в каждом объеме рассчитываются концентрации изотопов (компонентов). В общем виде дифференциальные уравнения (2.14) можно записать:

$$\frac{d(HC_i)}{dt} = G_{\text{нач}} C_{\text{нач}i} - G_{\text{кон}} C_i. \quad (2.16)$$

Далее заменим производные разностными уравнениями [8] и рассмотрим уравнение (2.16) на  $b$ -ом временном слое в момент времени  $t^{(b)}$ . Получим:

$$\frac{H^{(b)}C_i^{(b)} - H^{(b-1)}C_i^{(b-1)}}{\Delta t} = G_{\text{нач}}^{(b)}C_{\text{нач}}^{(b)} - G_{\text{кон}}^{(b)}C_i^{(b)}, \quad (2.17)$$

$$\Delta t = t^{(b)} - t^{(b-1)}. \quad (2.18)$$

Для всех выделенных объемов каждой ступени каскада запишем выражения вида (2.17) и выразим концентрации изотопов в потоках и объемах  $i$ -ой ступени через их концентрацию в потоке легкой фракции ГЦ. В результате получим систему линейных алгебраических уравнений относительно концентрации  $j$ -го изотопа в потоке легкой фракции ГЦ.

Полученная систем линейных алгебраических уравнений решается методом Гаусса [80] при известных значениях концентрации изотопов на предыдущем  $(b-1)$ -ом временном слое. В результате определим величины концентрации изотопов в потоке легкой фракции ГЦ в момент времени  $t^{(b)}$ .

Таким образом, совместный расчет нестационарных гидравлических и разделительных процессов сводится к определению величин потоков и давлений, а затем концентрации изотопов на каждом временном слое, в каждом объеме и потоке по приведенному алгоритму при условии соблюдения материального баланса по веществу и  $j$ -му изотопу в каскаде:

$$\left| \frac{(F^{(b)} - P^{(b)} - W^{(b)}) \cdot \Delta t}{H^{(b)} - H^{(b-1)}} - 1 \right| \leq \sigma_G, \quad (2.19)$$

$$\left| \frac{(F^{(b)}C_{Fi}^{(b)} - P^{(b)}C_{Pi}^{(b)} - W^{(b)}C_{Wi}^{(b)}) \cdot \Delta t}{H^{(b)}C_{Hi}^{(b)} - H^{(b-1)}C_{Hi}^{(b-1)}} - 1 \right| \leq \sigma_S, \quad (2.20)$$

$$H^{(b)} = \sum_{j=1}^K [H_{Mj}^{(b)} + H_{Fj}^{(b)} + H_{Wj}^{(b)} + H_{Pj}^{(b)}], \quad (2.21)$$

$$C_{Hi}^{(b)} = \frac{1}{H^{(b)}} \sum_{j=1}^K [H_{Mj}^{(b)}C_{Mji}^{(b)} + H_{Fj}^{(b)}C_{Fji}^{(b)} + H_{Wj}^{(b)}C_{Wji}^{(b)} + H_{Pj}^{(b)}C_{Pji}^{(b)}], \quad (2.22)$$

где  $H'$  – газосодержание каскада, кг;  $C_{Hj}$  – средневзвешенная концентрация  $i$ -го компонента в газосодержании каскада;  $\sigma_G, \sigma_S$  – критерии окончания итерационного процесса.

По алгоритму, описанному выше, создан программный продукт, разработанный на языке Delphi в среде Embarcadero Delphi XE2.

## 2.5 Результаты численного моделирования

При разделении изотопов германия в качестве рабочего вещества используется тетрафторид германия ( $\text{GeF}_4$ ) и каскад постоянной ширины (КПШ), имеющий одинаковую производительность всех ступеней  $G_F$ . Для него нами были введены безразмерные параметры [15, 81]:

$$\tau = \frac{G_F \varepsilon_0^2 t}{H}, \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_0 = \ln \chi_0, \quad (2.24)$$

$$y_P = \varepsilon_0 S, \quad (2.25)$$

где  $\tau$  – время;  $\varepsilon_0$  – коэффициент обогащения на единицу разности массовых чисел;  $y_P$  – координата точки отбора легкой фракции каскада;  $y_F$  – координата точки подачи потока питания ( $0 < y_F < y_P$ ).

Необходимые для расчета данные представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета

Рабочее вещество		Параметры каскада			
Обозначение	Молярная масса, $\mu$ , кг/кмоль	$y_F$	$y_P$	$\frac{\varepsilon_0 G_F}{P}$	$\frac{\varepsilon_0 G_F}{W}$
$\text{GeF}_4$	149	4,50	9,00	2,00	2,00

Таблица 2.2 – Исходный изотопный состав германия

Изотоп	$^{70}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}$	$^{73}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}$	$^{76}\text{Ge}$
Концентрация изотопа германия, %	20,84	27,54	7,73	36,28	7,61

Рассмотрен нестационарный процесс разделения, протекающий: 1) при увеличении потока питания и уменьшении потока легкой фракции каскада;

2) при заполнении каскада рабочим веществом и выводе его на стационарный режим.

В первом случае нестационарный процесс возникает при уменьшении величины потока легкой фракции каскада в течение промежутка времени  $\tau=0\dots0,02$  или при кратковременном увеличении потока питания каскада, после чего устанавливаются исходные величины потоков каскада.

Во втором случае он делится на два этапа:

1) Заполнение каскада рабочим веществом, которое сопровождается разделением изотопов и их распределением по длине каскада ГЦ. В течении этого этапа происходит увеличение гидравлических параметров ступеней каскада до стационарных значений.

2) Накопление изотопов. Изменение концентрации изотопов в ступенях и потоках каскада до стационарных значений происходит при практически постоянных гидравлических параметрах.

Расчет параметров нестационарного процесса разделения проведен нами для двух начальных состояний:

1) Концентрации изотопов всех потоков и ступеней и их концентрации в потоке питания каскада равны, а гидравлические параметры каскада ГЦ соответствуют стационарным значениям [15, 81].

2) В результате расчета параметров нестационарного заполнения каскада рабочим веществом получаем гидравлические параметры и концентрации изотопов в ступенях каскада.

На рисунке 2.4 представлена полученная нами в результате численного моделирования зависимость распределения изотопов германия по длине каскада ГЦ после его заполнения  $\text{GeF}_4$ . На рис. 2.5 и 2.6 для начальных состояний 1 и 2 приведены зависимости концентрации изотопов

германия в потоках легкой и тяжелой фракций каскада от времени вместе с результатами расчетов других авторов [15, 81] для начального состояния 1.

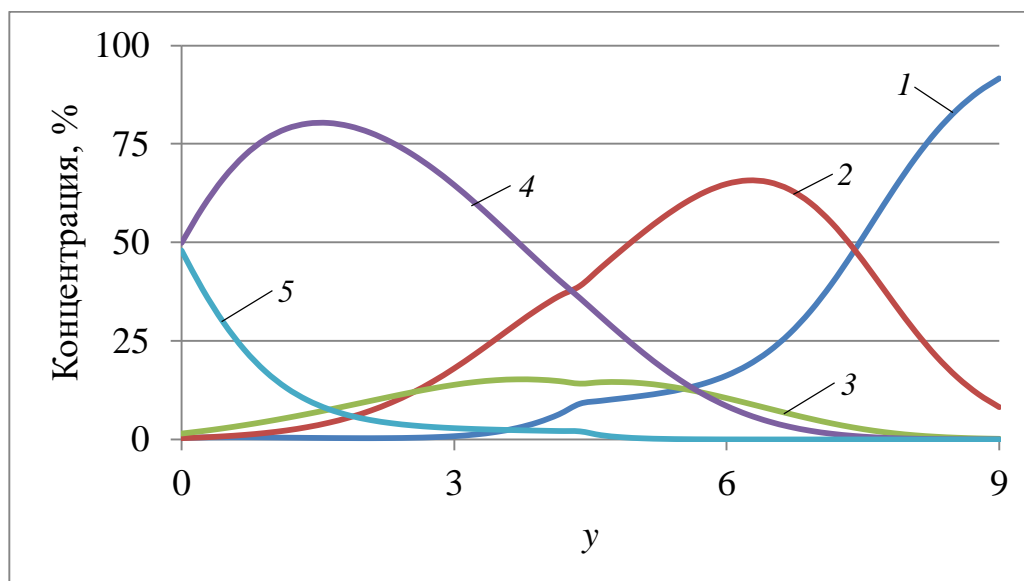


Рисунок 2.4 – Концентрация изотопов германия по ступеням каскада ГЦ после его заполнения  $\text{GeF}_4$ : 1 –  $^{70}\text{Ge}$ , 2 –  $^{72}\text{Ge}$ , 3 –  $^{73}\text{Ge}$ , 4 –  $^{74}\text{Ge}$ , 5 –  $^{76}\text{Ge}$

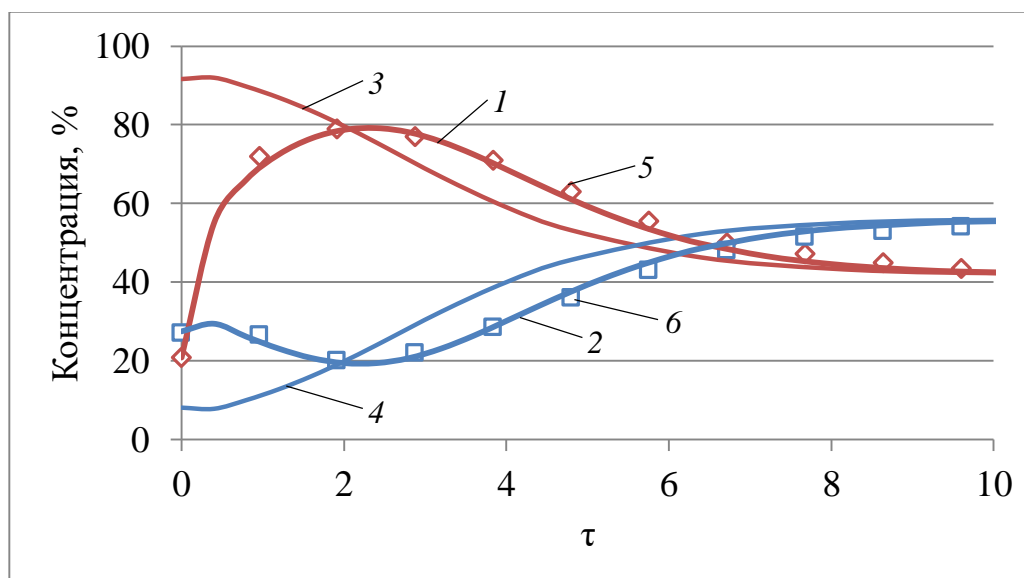


Рисунок 2.5 – Зависимость концентрации изотопов германия в потоке легкой фракции каскада ГЦ от времени: 1, 2 – наша модель для начального состояния 1, 3, 4 – наша модель для начального состояния 2, 5, 6 – модель [15, 81] для начального состояния 1; 1, 3, 5 –  $^{70}\text{Ge}$ , 2, 4, 6 –  $^{72}\text{Ge}$

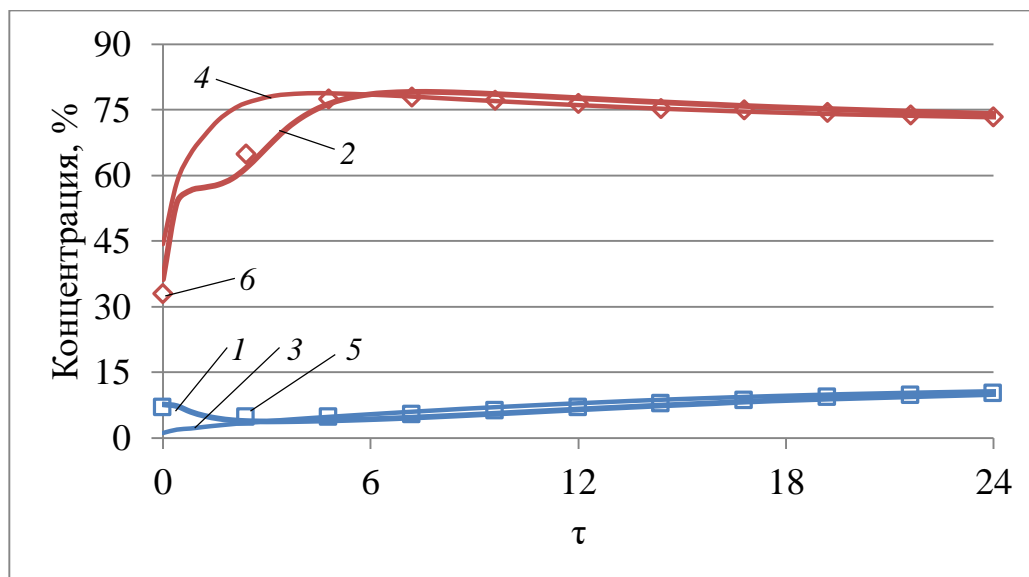


Рисунок 2.6 – Зависимость концентрации изотопов германия в потоке тяжелой фракции каскада ГЦ от времени: 1, 2 – наша модель для начального состояния 1, 3, 4 – наша модель для начального состояния 2, 5, 6 – модель [15, 81] для начального состояния 1; 1, 3, 5 –  $^{73}\text{Ge}$ , 2, 4, 6 –  $^{74}\text{Ge}$

Из рисунка 2.4 видно, что при заполнении каскада ГЦ рабочим веществом происходит разделение изотопов германия. После заполнения каскада  $\text{GeF}_4$  происходит распределение изотопов германия по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами.  $^{76}\text{Ge}$  концентрируется в ступени отбора тяжелой фракции ( $j = 1$ ),  $^{72}\text{Ge}$ ,  $^{73}\text{Ge}$  и  $^{74}\text{Ge}$  – в средней части каскада,  $^{70}\text{Ge}$  – в ступени отбора легкой фракции ( $j = K$ ). Следовательно, чем больше массовое число у изотопа германия, тем ближе он концентрируется в направлении отборной ступени тяжелой фракции каскада.  $^{72}\text{Ge}$ ,  $^{73}\text{Ge}$  и  $^{74}\text{Ge}$  достигают максимальной концентрации в ступенях средней части каскада ГЦ. При этом максимальное значение концентрации каждого изотопа германия зависит от его исходной концентрации в потоке питания каскада.

Из рисунков 2.5 и 2.6 видно, что результаты расчетов, полученные с использованием разработанной модели для начального состояния 1 (кривые 1 и 2), коррелируют с данными работ [15, 81]. Динамика изменения концентрации изотопов в потоках каскада в ходе нестационарного процесса



при начальных состояниях 1 и 2 различна. При расчете нестационарного процесса разделения из начального состояния 2 концентрации всех изотопов асимптотически приближаются к их значениям на стационарном режиме. В случае расчета из начального состояния 1 кривые изменения концентрации изотопов имеют ярко выраженные экстремумы. Самый легкий изотоп в потоке легкой фракции или самый тяжелый изотоп в потоке тяжелой фракции имеют максимальное значение концентрации. При этом длительность нестационарного процесса (установление постоянной концентрации изотопов в потоке) в случае расчета из начального состояния 2 меньше, чем при расчете из начального состояния 1.

Таким образом, характер изменения концентрации изотопов в ходе нестационарного процесса зависит от начального состояния каскада (значений концентраций изотопов в ступенях каскада после его заполнения в момент времени  $\tau=0$ ).

Можно предположить, что независимо от разделяемого химического элемента, изменение концентрации его изотопов в потоках легкой и тяжелой фракции каскада вызвано изменением концентраций этих изотопов в ступенях каскада в ходе нестационарного процесса.

Из рисунков 2.4–2.6 видно, что наибольшее изменение концентраций изотопов германия имеет место на концевых ступенях каскада ( $y=0$  и  $y=y_P$ ), наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания ( $y=y_F$ ).

### 3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе проводится анализ конкурентных разработок и рынка сбыта, определяются сильные и слабые стороны проекта, а также бюджет научного исследования и оценка научно-технического эффекта.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной диссертационной работе проведено численное исследование закономерностей нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг.

#### 3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования являются выявленные закономерности нестационарного разделения изотопов германия.

Потенциальными потребителями данного исследования будут являться заводы по обогащению изотопов и научная отрасль

На рисунке 3.1 представлены результаты сегментации потенциального рынка потребления данного исследования.

		Расчётная модель	
		Научная отрасль	Обогатительные предприятия
Потребность	Сильная		
	Слабая		

Рисунок 3.1 – Карта сегментирования рынка

### 3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Главное преимущество – это расчёт оптимальных параметров, при которых будет получен каскад, разделяющий изотопы с наименьшими затратами. Расчётная модель позволяет также избавиться от многочисленных экспериментов и крупных финансовых затрат на их реализацию. Исходя из этого, конкурентами для данной разработки могут стать:

- Экспериментальные исследования закономерностей нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг;
- Теоретический расчет закономерностей нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 3.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Для оценки конкурентных решений были выбраны следующие критерии: повышение производительности труда (насколько данное техническое решение поможет увеличить производительность труда на предприятии); удобство эксплуатации (возможность удобного использования модели для получения необходимых результатов); экономичность (сокращение материальных затрат на получение необходимых данных); надежность (точность и корректность получения данных в любой момент); закрытость получаемых данных (данный пункт важен для того, чтобы доступ к данным расчетной модели имел определенный круг лиц, а также, чтобы модель не оптимизировалась под новые параметры без участия разработчиков); потребность в материальных ресурсах (получение необходимых данных без высокого уровня затрат); стабильность (безотказность расчетной модели при различных устанавливаемых параметрах в любой момент времени); доступность (возможность приобретения предприятиями данной расчетной модели, либо получения результатов расчета заказчиками); конкурентоспособность (преимущества данной расчетной модели над иными способами получения данных); затраты на разработку (сколько потрачено материальных ресурсов на реализацию модели); предполагаемый срок эксплуатации (в течении какого периода возможно получать необходимые данные тем или иным способом); финансирование разработанного метода (начальное и дальнейшее вложение средств для получения данных различными способами).

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство эксплуатации	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
3. Экономичность	0,03	5	2	3	0,15	0,06	0,09
4. Надежность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Закрытость получаемых данных	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	4	0,25	0,05	0,2
7. Стабильность	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
8. Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность метода	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Затраты на разработку	0,12	5	1	3	0,6	0,12	0,36
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
4. Финансирование разработанного метода	0,1	5	1	3	0,5	0,1	0,3
Итого	1				5	2,92	3,25

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что разработанная в данной диссертационной работе модель является наиболее оптимальной для использования в практических целях. Конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. В свою очередь разработанная модель позволяет существенно снизить финансовые затраты, обеспечивает высокую точность расчётных значений и имеет высокий потенциал развития в дальнейшем.

### 3.1.2 Анализ внутренней и внешней среды

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [98].

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем [98].

В таблице 3.2 представлен анализ сильных и слабых стороны, потенциальных угроз и возможностей проекта

Таблица 3.2 – Анализ внутренней и внешней среды проекта

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Актуальность выбранной темы. С2. Применение современного оборудования и программного кода. С3. Бюджетное финансирование. С4. Получение результатов высокой точности. С5. Возможность оптимизации расчётной модели.	Сл1. Ограниченное применение конкретной модели. Сл2. Требуется экспериментальное подтверждение результатов. Сл3. Закрытость программного кода. Сл4. Ограниченный круг потребителей. Сл5. Ограниченные возможности расчёта (только для определенных компонентов).
Возможности	Угрозы
В1. Использование модели для исследований. В2. Разработка рекомендаций по применению модели для персонала. В3. Расширение возможностей расчётной модели. В4. Возможность исследования различных емкостей. В5. Дополнительный спрос на результаты исследования.	У1. Низкий спрос со стороны предприятий. У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями. У3. Сложность в продвижении модели. У4. Полное отсутствие спроса. У5. Разработка новейших моделей расчёта.

В таблице 3.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 3.3 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	С1	С2	С3	С4	С5
В1	+	+	+	+	+
В2	+	+	+	+	+
В3	+	+	+	+	+
В4	+	+	+	+	+
В5	+	+	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальность выбранной темы.</p> <p>С2. Применение современного оборудования и программного кода.</p> <p>С3. Бюджетное финансирование.</p> <p>С4. Получение результатов высокой точности.</p> <p>С5. Возможность оптимизации расчётной модели.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Ограниченное применение конкретной модели.</p> <p>Сл2. Требуется экспериментальное подтверждение результатов.</p> <p>Сл3. Закрытость программного кода.</p> <p>Сл4. Ограниченный круг потребителей.</p> <p>Сл5. Ограниченные возможности расчёта (только для определенных компонентов).</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование модели для исследований.</p> <p>В2. Разработка рекомендаций по применению модели для персонала.</p> <p>В3. Расширение возможностей расчётной модели.</p> <p>В4. Возможность исследования различных емкостей.</p> <p>В5. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Полное обеспечение условий для создания и применения модели для расчётов.</p> <p>2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики и использованием современных расчётных моделей.</p> <p>3. Высокая точность получаемых результатов позволяет повысить спрос на расчётную модель</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Необходимо экспериментальное подтверждение, что возможно реализовать в условиях вуза.</p> <p>2. Закрытость расчётной модели не отражается на точности результатов.</p> <p>3. Круг потребителей можно увеличить с помощью увеличения возможностей расчётной модели.</p>



## Продолжение таблицы 3.4 – SWOT-анализ

<p>Угрозы:          У1. Низкий спрос со стороны предприятий.          У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями.          У3. Сложность в продвижении модели.          У4. Полное отсутствие спроса.          У5. Разработка новейших моделей расчёта.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:          1. Благодаря возможностям расчётной модели и своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.          2. Так как существует возможность оптимизации расчётной модели, то это позволит конкурировать с новейшими разработками.          3. Дополнительное финансирование позволит продвинуть расчётную модель на рынок.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:          1. Создание подобных моделей другими организациями можно решить с помощью возможностей расчётной модели, которых нет у конкурентов.          2. Несовершенства разработанной модели можно решить с помощью оптимизации модели под требуемые параметры</p>
--	--	---

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разработанной модели такие как корректность, точность получаемых данных, возможность оптимизации модели, экономичность, стабильность, доступность, удобство эксплуатации, возможность получения данных «здесь и сейчас» значительно преобладают над её недостатками (небольшой круг потребителей, закрытость). Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

### 3.2 Планирование управления научно-техническим проектом

#### 3.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.



Рисунок 3.2 – Иерархическая структура работ

### 3.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2017	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2017	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2017	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2017	Обзор литературы
5	Календарное планирование работ	12.02.2017	План работ
6	Изучение возможностей расчётной модели	13.02.2017	Основные уравнения
7	Освоение методики расчёта на практике	14.02.2017	Математическая модель

Продолжение таблицы 3.5 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
8	Проведение расчётов	15.02.2017- 30.03.2017	Графики
9	Анализ полученных данных	28.03.2017	Вывод
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2017	Заключение
11	Составление пояснительной записки	14.02.2017- 25.04.2017	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2017	
13	Подготовка к защите	27.04.2017- 25.05.2017	

### 3.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ [98].

Линейный график представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	1	1.02.2017	2.02.2017	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	1	3.02.2017	4.02.2017	Руководитель
3	Выбор направления исследований	3	5.02.2017	7.02.2017	Руководитель, студент
4	Подбор и изучение материалов по теме	6	7.02.2017	12.02.2017	Студент

Продолжение таблицы 3.6 – Календарный план проекта

5	Календарное планирование работ	1	12.02.2017	13.02.2017	Руководитель, студент
6	Изучение возможностей расчётной модели	1	13.02.2017	14.02.2017	Студент
7	Освоение методики расчёта на практике	1	14.02.2017	14.02.2017	Студент
8	Проведение расчётов	45	15.02.2017	30.03.2017	Студент
9	Анализ полученных данных	2	28.03.2017	30.03.2017	Студент
10	Обобщение и оценка результатов	1	30.03.2017	30.03.2017	Руководитель, студент
11	Составление пояснительной записки	72	14.02.2017	25.04.2017	Студент
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	26.04.2017	27.04.2017	Руководитель, студент
13	Подготовка к защите	29	27.04.2017	25.05.2017	Студент

В таблице 3.7 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 3.7 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал.дн	Продолжительность выполнения работ														
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Разработка технического задания	Руководитель	2	■														
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	■														
3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент	5	■	■													
4	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	2		■													
5	Календарное планирование работ	Руководитель, студент	1	■	■													
6	Изучение возможностей расчётной модели	Студент	1		■													
7	Освоение методики расчёта на практике	Студент	1		■													
8	Проведение расчётов	Студент	45		■	■	■	■	■									
9	Анализ полученных данных	Студент	2						■	■								
10	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, студент	1						■	■								
11	Составление пояснительной записки	Студент	72		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент	1									■	■					
13	Подготовка к защите	Студент	29											■	■	■	■	

■ – Руководитель

■ – Студент

### 3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### 3.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15 – 25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 3.8.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 3,42 \cdot 0,5 \cdot 960 = 1642,$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (3,42 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 1642 рубля.

Таблица 3.8 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия	–	480 кВт·ч	5,8	1642
Бумага	SvetoCopy	110	0,90	99
Печать на листе А4	–	110	1,5	165
Доступ в интернет	–	4 месяца	350	1400
Всего за материалы	4498			
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье $C_m$				3306

### 3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_d,$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	56	48
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	251

Студент во время обучения ежемесячно получает стипендию в размере 1906 руб. (без учета РК).

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

- иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью профессор и степенью доктор наук. Оклад профессора составляет 47104 рублей (без учета РК).

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:



$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p,$$

где  $Z_{ок}$  – заработная плата по окладу, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 3.10 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Исполнители	$Z_{ок}$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$Z_{ч}$ , руб.	$T_{раб}$	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	47104	1,30	61235	2041	–	8 д.	16328
Студент	1906	1,30	2478	–	–	4 м.	9912
Итого $Z_{осн}$ :							26240

### 3.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot 16328 = 4898 \text{ руб.}$$

### 3.3.4 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 12 – 16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Примем  $k_{\text{накл}} = 15 \%$ .

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,15 \cdot (13792+4898+9912) = 4290 \text{ руб.}$$

### 3.3.5 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Расчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	3306
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	26240
3. Отчисления во внебюджетные фонды	4898
4. Накладные расходы	4290
Бюджет затрат исследования	38734

### 3.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель).

Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Организационная структура научного проекта

### 3.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответствие»	Консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И
Изучение возможностей расчётной модели					И
Освоение методики расчёта на практике					И
Проведение расчётов	О				И
Анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

– ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;

- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта.
- утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);
- согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

### 3.6 Оценка научно-технического эффекта

Социально-научный эффект проявляется в росте числа открытий, изобретений, увеличении суммарного объёма научно-технической информации, полученной в результате выполнения НИОКР, создании научного «задела», являющегося необходимой предпосылкой для проведения в будущем прикладных НИОКР и выполнения работ по модернизации конструкции выпускаемых изделий.

За последние годы появились предложения не только по качественной характеристике социального эффекта, но и по системе количественных показателей его оценки.

Элементом количественной оценки социально-научного эффекта следует считать определение научно-технического эффекта НИОКР. Методика состоит в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент научно-технического эффекта НИОКР:

$$H_T = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot k_i,$$

где  $r_i$  – весовой коэффициент  $i$ -того признака (определяется по таблице 3.13);

$k_i$  – количественная оценка  $i$ -того признака.

Таблица 3.13 – Показатели научно-технического эффекта

Признак научно-технического эффекта НИОКР ( <i>i</i> )	Примерные значения весового коэффициента ( <i>r</i> )
Уровень новизны	0,6
Теоретический уровень	0,4
Возможности реализации	0,2

Количественная оценка уровня новизны НИОКР определяется на основе значения баллов по таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Количественная оценка уровня новизны НИОКР

Уровень новизны разработки	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Результаты исследований открывают новое направление в данной области науки и техники	8-10
Новая	По-новому или впервые объяснены известные факты, закономерности	5-7
Относительно новая	Результаты исследований систематизируют и обобщают имеющиеся сведения, определяют пути дальнейших исследований	2-4
Традиционный характер	Работа, выполненная по традиционной методике, результаты исследований носят информационный характер	1
Не обладающая новизной	Получен результат, который был ранее известен	0

Теоретический уровень полученных результатов НИОКР определяется на основе значения баллов, приведённых в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Оценка теоретического уровня полученных результатов

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
Установление закона; разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы: многоаспектный анализ связей, взаимозависимости между фактами с наличием объяснения	8
Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, новшество и т.п.)	6
Элементарный анализ связей между фактами с наличием гипотезы, симплексного прогноза, классификации, объясняющей версии или практические рекомендации частного характера	2
Описание отдельных элементарных фактов (вещей, свойств и отношений); изложение опыта, наблюдений, результатов измерений	0,5

Возможность реализации научных результатов определяется на основе значения баллов (таблица 3.16).

Таблица 3.16 – Оценка времени реализации полученных результатов

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Более 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль (министерство)	4
Народное хозяйство	10
Примечание: Баллы по времени и масштабам реализации складываются	

Результаты исследований систематизируют и обобщают имеющиеся сведения, вследствие чего определим уровень новизны разработки как новый, т.е.  $k_1 = 7$ .

В результате исследования были выявлены закономерности нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг;  $k_2 = 6$ .

Возможность реализации результатов разработки: по времени – в течение первых лет, по масштабам реализации – на одном или нескольких предприятиях. В соответствии с таблицей 3.15  $k_3 = 10+2 = 12$ .

$$H_T = 0,6 \cdot 7 + 0,4 \cdot 6 + 0,2 \cdot 12 = 9$$

Таблица 3.17 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень научно-технического эффекта	Коэффициент научно-технического эффекта
Низкий	1-4
Средний	5-7
Сравнительно высокий	8-10
Высокий	11-14

В соответствии с таблицей 3.17, уровень научно-технического эффекта – сравнительно высокий.

По результатам исследования рынка потенциальных потребителей можно сделать вывод об относительно небольшой востребованности предлагаемой математической модели нестационарного разделения изотопов германия, ввиду его узкой направленности. Однако анализ конкурентных разработок показал, что данная модель является лучшим вариантом среди доступных изобретений ввиду её простоты и экономической эффективности. Проведённая оценка научно-технического потенциала проекта также подтверждает целесообразность и относительную эффективность исследуемой модели.



## 4 Охрана труда и техника безопасности

### 4.1 Введение

Для снижения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости повсеместно внедряется комплексная система управления охраной труда. Совместно с внедрением системы охраны труда должно проводиться непрерывное повышение качества и эффективности средств индивидуальной и коллективной защиты от вредных и опасных факторов, с которыми сталкивается рабочий персонал в течение профессиональной деятельности.

Охрана труда – система обеспечения безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические и иные мероприятия.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого может привести к травме или другому резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего может привести к заболеванию или снижению трудоспособности [99].

Сложность обеспечения охраны труда сводится к использованию достижений многих областей человеческой деятельности, связанных с созданием безопасности труда. Так, при разработке требований производственной санитарии используются результаты ряда медико-биологических исследований.

Успешное решение задач по обеспечению безопасности труда во многом зависит от квалификации специалистов в этой области, от их умения оперативно принимать правильные решения в сложных условиях производства.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях

профилактики несчастных случаев и являются обязательными для исполнения рабочими, инженерно-техническим и руководящим составом.

#### 4.2 Характеристика вредных и опасных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-15 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Ионизирующее излучение (ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее)	—	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
	—	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность

На работника лаборатории воздействуют следующие факторы:

– физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;

– психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно–психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.3. Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

4.3.1. Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

#### 4.3.2. Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рис. 4.1.

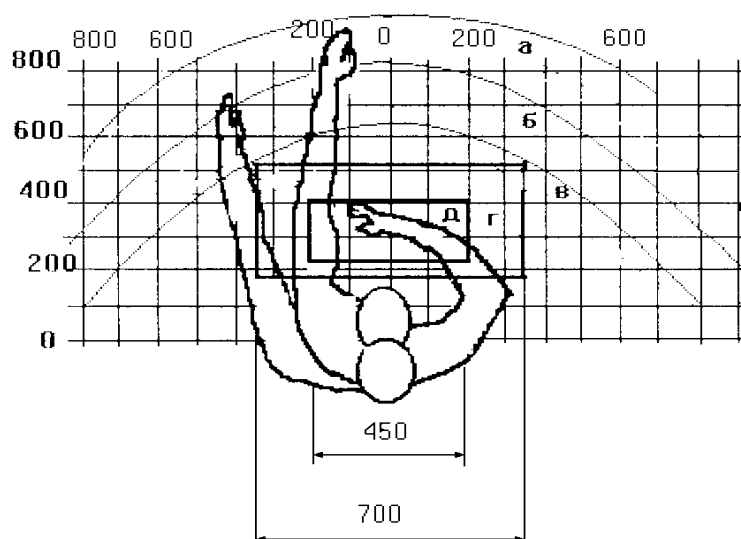


Рисунок 4.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

- а – зона максимальной досягаемости рук;
- б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в – зона легкой досягаемости ладони;
- г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);

документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглаблённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её

размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

#### 4.4. Условия безопасной работы с ПЭВМ

Основные параметры, характеризующие условия труда – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [100] и приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока. Согласно [101]

напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц– 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с ПЭВМ, источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [100] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

#### 4.5 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более



35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ПЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний характер. Проходя через тело человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов; электролитическое – в разложении органической жидкости, в том числе крови, что вызывает нарушение ее состава, а также ткани в целом; механическое – в расслоении, разрыве тканей организма; биологическое – в раздражении и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биологических процессов. Например, взаимодействуя с биотоками организма, внешний ток может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и вызвать непроизвольные сокращения мышц.

Существуют три основных вида поражения электрическим током: электрические травмы, электрические удары, электрический шок.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей) [101].

#### 4.6 Пожарная безопасность

Согласно [102], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации (рис. 4.2.);
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;

– своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

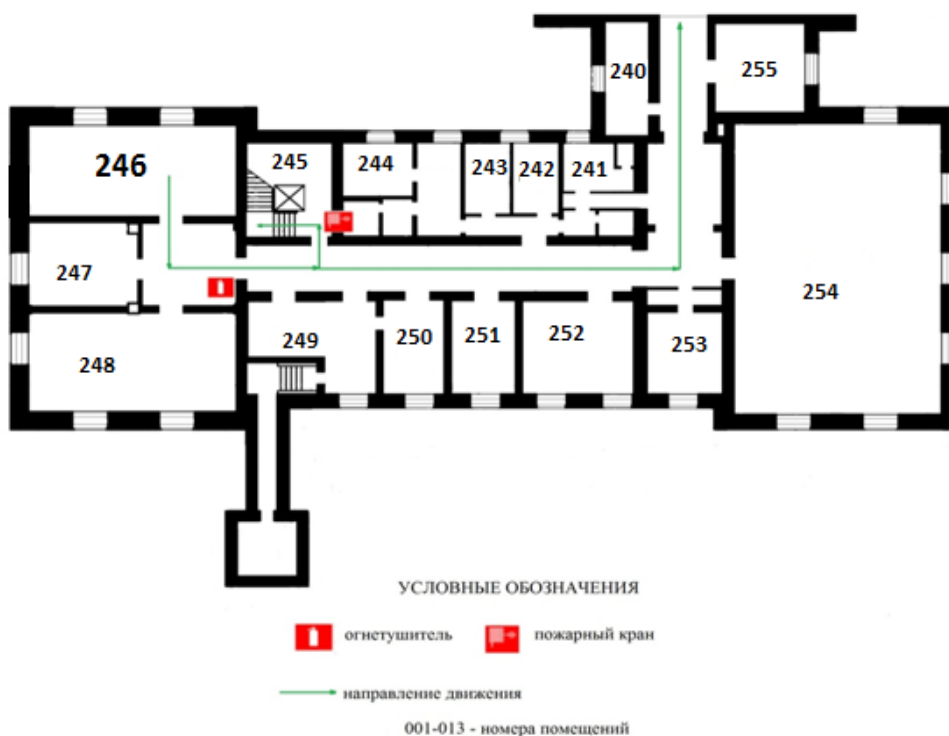


Рисунок 4.2 – План эвакуации при пожаре и других ЧС

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## Выводы. Заключение

1. С использованием математической модели [95] проведены численные исследования нестационарного процесса разделения изотопов германия в каскаде постоянной ширины при его заполнении рабочим веществом и накоплении изотопов до стационарных значений при практически неизменных гидравлических параметрах каскада.

2. Показано, что в процессе заполнения происходит разделение изотопов германия. После заполнения каскада изотопы германия распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов германия имеет место на концевых ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания

3. Показано, что результаты численного моделирования разделения изотопов германия хорошо согласуются с данными других авторов для случая, когда гидравлические параметры каскада соответствуют стационарным (состояние 1). Характер изменения концентрации изотопов германия в ходе нестационарного процесса зависит от начального состояния каскада. Длительность нестационарного процесса в случае расчета из начального состояния 2 меньше, чем при расчете из начального состояния 1.

Выявленные закономерности нестационарного разделения изотопов германия внесут вклад в развитие теории разделения многокомпонентных изотопных смесей и могут быть использованы при оптимизации режима разделения этих изотопов в АО «ПО ЭХЗ», г. Зеленогорск.

## Список используемых источников

1. Изотопы: свойства, получение, применение / Под ред. В.Ю. Баранова. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. 600 с.
2. Бабушкина Н.А., Баранов В.Ю., Гапонов Ю.В. Обзор современных областей применения изотопов в ядерной энергетике, физике, полупроводниковой электронике // Сб. докладов VII Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». ЦНИИАтоминформ. 2002. С. 65–78.
3. Cohen K. The theory of isotope separation as applied to the large-scale production of U-235. New York: McGraw Hill. 1951. 165 p.
4. Миненко В.П. Предельное обогащение промежуточных изотопов в отборе с концов каскада // Атомная энергия. 1972. Т. 33. № 2. С. 703–704.
5. Sulaberidze G.A., Borisevich V.D., Xie Q. Quasi-ideal cascades with an additional flow for separation of multicomponent isotope mixtures // Theoretical foundations of chemical engineering. 2006. Vol. 40. № 1. P. 5–13.
6. Zeng S., Jiang D., Borisevich V., Sulaberidze G. Use of the Q-Cascade in calculation and optimization of multi-isotope separation // Chemical engineering science. 2011. Vol. 66. № 13. P. 2997–3002.
7. Борисевич В.Д., Литвин Ю.В., Сулаберидзе Г.А. Расчетно-теоретические исследования при обогащении изотопов кадмия на газовых центрифугах // Теоретические основы химической технологии. 2007. Т. 41. № 6. С. 655–661.
8. Скорынин Г.М., Орлов А.А., Сенченко В.В. Исследование возможности проведения изотопного обмена в диоксиде углерода в каскаде газовых центрифуг // Известия Томского политехнического университета. Химия. 2008. Т. 313. № 3. С. 37–39.
9. Патент на изобретение № 2236895 РФ, МПК7 B01D 59/20. Центробежный способ получения высокообогащенного изотопа  $^{13}\text{C}$  и устройство для проведения реакций изотопного обмена в каскаде газовых

центрифуг // Пульников И.И., Рябухин А.В., Сенченко В.В. и др. Заяв. 10.04.2002. Опубл. 27.10.2003. Бюл. № 30.

10. Vlasov V.A., Butov V.G., Goldobin D.N., etc. Simulation of non-stationary processes in centrifugal cascades // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2007. V. 310. № 2. P. 96–99.

11. Левин Д.М., Забелин Ю.П. Распространение динамических возмущений в каскаде для разделения изотопов // Сб. докладов XII Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул и в лазерных, плазменных и нанотехнологиях». ЦНИИАтоминформ. 2008, С. 96–98.

12. Higashi K. Transient behavior of minor isotopes in cascade for uranium enrichment // Journal of nuclear science and technology. 1975. Vol. 12. № 4. P. 243–249.

13. Левин Е.В., Лагунцов Н.И., Сулаберидзе Г.А. Об одном методе численного исследования нестационарных процессов в многосекционных установках для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 43. № 3. С. 456–462.

14. Вецко В.М., Девдариани О.А., Левин Е.В. и др. Моделирование переходных процессов в каскадных установках для разделения многокомпонентных смесей стабильных изотопов // Isotopenpraxis. 1982. Т. 18, № 8. С. 288–293.

15. Лагунцов Н.И., Левин Е.В., Николаев Б.И. и др. О некоторых особенностях переходных процессов при разделении многокомпонентных изотопных смесей в каскадах // Атомная энергия. 1987. Т. 62. № 6. С. 394–398.

16. Вецко В.М., Лагунцов Н.И., Левин Е.В. и др. Переходные процессы в двойных каскадах для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Атомная энергия. 1987. Т. 63. № 3. С. 184–188.

17. Zeng S., Ying C. Transient process in gas centrifuge cascades for separation of multicomponent isotope mixture // Separation science and

technology. 2001. Vol. 36. № 15. P. 3439–3457.

18. Zeng S., Zhou M., Ying C. Theoretical and experimental study of a non-stationary isotope separation process in a gas centrifuge cascade // Separation science and technology. 2003. Vol. 38. № 11. P. 2375–2394.

19. Smirnov A.Yu., Bonarev A.K., Sulaberidze G.A., etc. Peculiarities of the transient processes in cascades for separation of isotope mixtures with various numbers of components // Journal of physics: Conference Series. 2016. Vol. 751. 012006.

20. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Borisevich V.D., etc. Transient processes in Q-cascades for separation of multicomponent mixtures // Chemical Engineering Science. 2015. Vol. 127. P. 418–424.

21. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука. 1978. 831 с.

22. Suvorov I.A., Tcheltsov A.N., Sosnin L.Yu., etc. Centrifugal extraction of highly enriched tin isotopes and increase of specific activity of the radionuclide  $^{119m}\text{Sn}$  on the gas centrifuge cascade // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2002. A 480. P. 22–28.

23. Sosnin L.Yu., Tcheltsov A.N., Kuchelev A.P., etc. Centrifugal extraction of highly enriched  $^{120}\text{Te}$  and  $^{122}\text{Te}$  using the non-steady state method of separation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2002. A 480. P. 36–39.

24. Babaev N.S., Cheltsov A.N., Sazykin A.A., etc. Centrifugal enrichment of mercury isotopes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010. A 613. P. 473–476.

25. Сергеев В.И. Разработка и создание газоцентрифужного метода разделения изотопов в СССР (России). СПб: ЛПНН «Облик». 2002. 496 с.

26. Афанасьев В.Г., Колесников А.И., Стерхов М.И. Производство стабильных изотопов на Сибирском химическом комбинате. Сб. докладов XII Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул и в лазерных, плазменных и нанотехнологиях».



ЦНИИАтоминформ. 2008. С. 53–55.

27. Колокольцов Н.А., Лагунцов Н.И. К теории несимметричных разделительных каскадов при произвольных обогащениях на разделительном элементе // Атомная энергия. 1970. Т.29. № 4 С. 300–301.

28. Benedict M., Pigford T. Nuclear Chemical Engineering. New York: McGraw Hill. 1957.

29. Колокольцов Н.А., Миненко В.П., Николаев Б.И. и др. К вопросу о построении каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Атомная энергия. 1970. Т. 29. № 6. С. 425–429.

30. Фролов В.В., Чужинин В.А., Сулаберидзе Г.А. Расчет и оптимизация каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Атомная энергия. 1986. Т. 61. № 6. С. 457–459.

31. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се О сравнении оптимальных и модельных каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей при произвольном обогащении на ступенях // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 4. С. 361–367.

32. Smirnov A. Yu., Sulaberidze G. A., Borisevich V. D. Influence of feed flow profile of cascade stages on the mass transfer of intermediate components // Theoretical foundations of chemical engineering. 2010. Vol. 44. № 6. P. 888–896.

33. Zeng S., Sulaberidze G.A., Jiang D., etc. The Q-cascade explanation // Separation science and technology. 2012. Vol. 47. P. 1591–1595.

34. Zeng S., Smirnov A.Yu., Jiang D., etc. Isotopically selective mass transfer in the Q-cascade with losses of working substance // Separation science and technology. 2013. Vol. 48. P. 15–21.

35. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Q-cascades for obtaining highly concentrated intermediate components of separated mixtures // Theoretical foundations of chemical engineering. 2013. Vol. 47. № 4. P. 375–380.

36. Смирнов А.Ю. Молекулярно-селективный массоперенос компонентов в ординарных и многопоточных каскадах кусочно-непрерывного профиля для разделения многокомпонентных изотопных

смесей в ядерном топливном цикле: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ. 2013. 131 с.

37. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Comparison of methods of enriching intermediate components in cascades with the same number of separative elements // *Atomic Energy*. 2015. Vol. 117. № 5. P. 340–346.

38. Zeng S., Jiang D.J., Zhang Y.N., etc. Enhancing the performance of Q-cascade for separating intermediate components // *Journal of physics: Conference Series*. 2016. Vol. 751. 012004.

39. Кучеров Р.Я., Миненко В.П. К теории каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей // *Атомная энергия*. 1965. Т. 19. № 4. С. 360-367.

40. Колокольцов Н.А., Сулаберидзе Г.А., Лагунцов Н.И. Условия оптимизации реальных прямоугольно-ступенчатых каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей // *Атомная энергия*. 1972. Т. 33. № 2. С. 704-706.

41. Колокольцов Н.А., Лагунцов Н.И., Николаев Б.И. и др. К расчету каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей // *Атомная энергия*. 1975. Т. 38. № 3. С. 178–179.

42. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Features of mass transfer of intermediate components in square gas centrifuge cascade for separating multicomponent mixtures // *Theoretical foundations of chemical engineering*. 2014. Vol. 48. № 5. P. 629–636.

43. Колокольцов Н.А. К вопросу о построении идеальных несимметричных разделительных каскадов // *Атомная энергия*. 1969. Т. 27. № 1. С. 9-13.

44. Колокольцов Н.А., Сулаберидзе Г.А. Построение наивыгоднейших несимметричных каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей // *Атомная энергия*. 1971. Т. 31. № 3. С. 223–225.

45. Палкин В.А., Розенбаум А.Е. Метод расчета оптимальных параметров противоточного каскада с произвольной схемой соединения

ступеней // Атомная энергия. 2000. Т. 88. № 2. С. 142–148.

46. Палкин В.А., Игошин И.С. Определение оптимальных параметров каскада газовых центрифуг с произвольной схемой соединения ступеней // Атомная энергия. 2012. Т. 112. № 1. С. 38–42.

47. Колокольцов Н.А. Повышение эффективности каскадов для разделения изотопов путем применения ступеней с числом выходящих потоков более двух // Атомная энергия. 1974. Т. 37. № 1. С. 32–34.

48. Гадельшин В.М., Шульгин Б.В., Палкин В.А. Способ разделения изотопов // патент на изобретение № 2500461. Заявл. 11.03.2012. Публ. 10.12.2013. Бюл. № 34.

49. Палкин В.А., Игошин И.С. Оптимизация процесса разделения трехкомпонентной смеси в каскаде из элементов с тремя отборами // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 97. № 3. С. 509–516.

50. De la Garza A., Garrett G., Murphy J. Multicomponent isotope separation in cascades // Chemical engineering science. 1961. Vol. 15. P. 188–209.

51. Lehrer-Plamed Y. On the value function for multicomponent isotope separation // Journal of nuclear energy. 1969. Vol. 23. P. 559–567.

52. Колокольцов Н.А., Николаев Б.И., Сулаберидзе Г.А. и др. О функции ценности в каскадах для разделения многокомпонентной изотопной смеси // Атомная энергия. 1970. Т. 29. № 2. С. 128–130.

53. Yamamoto I., Kanagawa A. Multicomponent isotope separating cascade composed of elements with large separation factors // Journal of nuclear science and technology. 1978. Vol. 15. № 8. P. 580–584.

54. Yamamoto I., Kanagawa A. Synthesis of value function for multicomponent isotope separation // Journal of nuclear science and technology. 1979. Vol. 16. № 1. P. 43–48.

55. Жигаловский Б.В. Лекционные материалы по многокомпонентным смесям. Новоуральск: УЭХК. 1999. 57 с.

56. Палкин В.А. Обобщение решения Смородинского для потенциала разделения многокомпонентной смеси изотопов // Атомная энергия. 2003. Т.

95. № 5. С. 373–382.

57. Палкин В.А. Потенциалы разделения многокомпонентной смеси изотопов // Атомная энергия. 2013. Т. 115. № 4. С. 230–235.

58. Палкин В.А., Гадельшин В.М., Александров О.Е. и др. Многокомпонентный разделительный потенциал. Обобщение теории Дирака // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 3. С. 501–508.

59. Sulaberidze G.A., Borisevich V.D., Smirnov A.Yu. Separation potential for multicomponent mixtures: state-of-the art of the problem // Journal of engineering physics and thermophysics. 2017. Vol. 90. № 2. P. 251–257.

60. Sulaberidze G.A., Borisevich V.D. Cascades for separation of multicomponent isotope mixtures // Separation science and technology. 2001. Vol. 36. № 8. P. 1769–1817.

61. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се. Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 40. № 1. С. 7–17.

62. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Xie Q., etc. Design of cascade with locally enlarged flow for enrichment of intermediate components of multi-isotope mixtures // Chemical engineering research and design. 2015. Vol. 95. P. 47–54.

63. Палкин В.А. Многопоточные каскады для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Атомная энергия. 2015. Т. 119. № 2. С. 101–105.

64. Сазыкин А.А. Термодинамический подход к разделению изотопов // Сб. докладов IX Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». Звенигород, 2004, с. 32–37.

65. Палкин В.А. Расчет и оптимизация каскада с несколькими потоками питания по срезам парциальных потоков // Сборник XI Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул и в лазерных, плазменных и нанотехнологиях».

ЦНИИАтоминформ. 2006. С. 29–33.

66. Палкин В.А., Маслюков Е.В. Расчет каскада с несколькими питаниями и отборами по срезам парциальных потоков // Атомная энергия. 2012. Т. 112. № 5. С. 309–313.

67. Палкин В.А., Маслюков Е.В. Оптимизация каскада по срезам парциальных потоков при заданной концентрации целевого компонента // Атомная энергия. 2012. Т. 117. № 2. С. 89–93.

68. Levin S.A. The separation of isotopes of elements other than uranium by the gaseous diffusion process // J. de chim. phys. et de phys.-chim. biol. 1963. Vol. 60. P. 277–284.

69. Shmelev A.N., Smirnov A.Yu., Bonarev A.K., etc. Isotopically modified molybdenum for safe nuclear power // Theoretical foundations of chemical engineering. 2016. Vol. 50. № 6. P. 1049–1057.

70. Хорасанов Г.Л., Иванов А.П., Блохин А.И. и др. Пути снижения затрат на утилизацию свинцового теплоносителя быстрого реактора за счет его обогащения свинцом-206 // Сб. докладов VI Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». ЦНИИАтоминформ. 2001. С. 24–29.

71. Калитеевский А.К., Годисов О.Н., Мязин Л.П. и др. Разработка технологии центробежного метода получения обогащенного изотопа ванадий-50 // Сб. докладов VII Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». ЦНИИАтоминформ. 2002. С. 165–167.

72. Филимонов С.В., Скорынин Г.М., Голдобин Д.Н. Моделирование нестационарных гидравлических процессов в АСУТС промышленного обогащения урана // Известия высших учебных заведений. Физика. 2004. № 11. С. 173–177.

73. Филимонов С.В., Скорынин Г.М., Орлов А.А. и др. Моделирование нестационарных гидравлических процессов в промышленных центрифужных каскадах обогащения урана // Известия

Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 3. С. 85–88.

74. Филимонов С.В., Скорынин Г.М., Орлов А.А., Голдобин Д.Н. Моделирование нестационарных процессов в промышленных центрифужных каскадах обогащения урана // Известия ТПУ, Т. 309, № 4, 2006. – С. 77–80.

75. Власов В.А., Орлов А.А., Бутов В.Г. и др. Моделирование нестационарных гидравлических процессов в каскадах газовых центрифуг по обогащению изотопов урана // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 2. С. 94–97.

76. Orlov A.A., Timchenko S.N., Sidorenko V.S. Mathematical model of non-stationary hydraulic process occurring in gas centrifuges for uranium enrichment // Advanced materials research. 2015. Vol. 1084. P. 673–677.

77. Орлов А.А., Тимченко С.Н., Сидько Д.Ф. Математическая модель нестационарных гидравлических процессов, протекающих при обогащении изотопов урана // Известия ВУЗов. Физика. – 2013, Т.56, № 4/2. С. 87–90.

78. Власов В.А., Орлов А.А., Тимченко С.Н. и др. Компьютерный тренажер для подготовки оперативного технологического персонала центробежного производства разделения изотопов урана // Известия высших учебных заведений. Физика. 2004. № 11. С. 224–229.

79. Пирумов У.Г. Численные методы. М.: Дрофа, 2003.

80. Лагунцов Н.И., Левин Е.В., Сулаберидзе Г.А. К расчету на ЭВМ нестационарных процессов в многоступенчатых каскадах для разделения двухкомпонентных изотопных смесей // Инженерно-физический журнал. 1976. Т. 31. № 3. С. 506–513.

81. Лагунцов Н.И., Левин Е.В., Сулаберидзе Г.А. Особенности нестационарного массопереноса в каскадах для разделения бинарных смесей изотопов // Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 50. №5. С. 798–803.

82. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М.: Наука. 1979. 306 с.

83. Филимонов С.В., Скорынин Г.М., Орлов А.А. и др. Моделирование нестационарных процессов в промышленных центрифужных

каскадах обогащения урана // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 4. С. 77–80.

84. Сулаберидзе Г.А., Палкин В.А., Борисевич В.Д. и др. Теория разделения изотопов в каскадах. М.: НИЯУ МИФИ, 2007. 396 с.

85. Shi Zeng, Mingshen Zhou, and Chuntong Ying. Theoretical and Experimental Study of a Non-stationary Isotope Separation Process in a Gas Centrifuge Cascade. SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY Vol. 38, No. 11, pp. 2375–2394, 2003.

86. [Электронный ресурс] Энциклопедический словарь. Германий. Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/es/15328/германий>.

87. [Электронный ресурс] Stable Isotopes Supplier. Режим доступа: <http://www.tracesciences.com>.

88. [Электронный ресурс] Объединенный институт ядерных исследований. Режим доступа: <http://www.jinr.ru/posts/eksperiment-gerda-k-otkrytiyu-redchajshego-raspada-gotovy>.

89. [Электронный ресурс] INSPACE FORUM. Режим доступа: <https://inspaceforum.ru/ru/post/zapushchen-proekt-majorana-demonstrator>.

90. Скорынин Г.М., Орлов А.А. Современные области применения изотопной продукции // Известия ВУЗов. Физика. – 2018, С.122.

91. De la Garza A, Garrett G.A., and Murphy J.E. // Chem. Eng. Sci.– 1961.– V.15. – P.188–209.

92. Von Halle E. // Separation Phenomena in Liquids and Gases. – 1987. – V. 1. – P.325–356.

93. Ying C., Guo Z., and Wood H.G. // Separation Science and Technology. – 1996. – V.31. – P.2455–2471.

94. Laguntcov N.I., Levin E.V., Nikolaev B.I., and Sulaberidze G.A. // Atomic Energy. – 1987. – V. 62. – P. 394–398.

95. Орлов А. А., Ушаков А. А., Совач В. П. Математическая модель нестационарных гидравлических процессов, протекающих в каскаде газовых центрифуг при разделении многокомпонентных изотопных смесей.

*Альтернативная энергетика и экология*. 2015. Т. 23, № 187. С. 45–50.

96. Пирумов У. Г. *Численные методы*. Москва: Дрофа, 2003.

97. Сулаберидзе Г.А., Палкин В.А., Борисевич В.Д., Борман В.Д., Тихомиров А.В. *Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей*. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "Московский инженерно-физический институт", 2011, 368 с.

98. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.

99. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17.07.1999 N 181-ФЗ (ред. от 09.05.2005, с изм. от 26.12.2005) "Об основах охраны труда в Российской Федерации".

100. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.

101. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.

102. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.



## Приложение А

(обязательное)

### Section 2

Mathematical model of nonstationary separation processes proceeding in the cascade of gas centrifuges in the process of separation of multicomponent isotope mixtures

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Шинкевич Роман Алексеевич		

Консультант ОЯТЦ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	Новосёлов И.Ю.			

Консультант – лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель ОИЯ	Шайкина О.И.			

## Abstract

We have developed and realized on software a mathematical model of the nonstationary separation processes proceeding in the cascades of gas centrifuges in the process of separation of multicomponent isotope mixtures. With the use of this model the parameters of the separation process of germanium isotopes have been calculated. It has been shown that the model adequately describes the nonstationary processes in the cascade and is suitable for calculating their parameters in the process of separation of multicomponent isotope mixtures.

Keywords: centrifuge, multicomponent isotopic mixture, germanium isotopes, math modeling, cascade.

## Contents

Introduction	92
2.1 Description of the Mathematical Model of Nonstationary Separation Processes. Basic Parameters of the Stage and the Cascade	94
2.2 Section of the model	96
2.3 Basic equations describing the nonstationary processes	98
2.4 Solution Algorithm for Nonstationary Separation Equations	99
2.5 Results of the Calculation of the Cascade for Germanium Isotope Separation	101
Conclusions	105
References	106

## Introduction

Centrifugal separation is one of the most common industrial methods of separation of stable and radioactive isotopes of various chemical elements having volatile compounds. The separation process in the cascade of gas centrifuges (GC) is realized with the use of the process gas – a gaseous compound, whose molecules can consist of atoms of both one (desired) chemical element (for example, Ar, Kr, Xe) and several atoms (for example,  $\text{WF}_6$ ,  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ,  $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ ) and define the process gas as a multicomponent isotope mixture (MIM).

The technological process of MIM separation in the GC centrifuge proceeds continuously in the steady-state regime. However, in the course of operation, nonstationary hydraulic processes arise, during which the values of pressures and process gas flows change in the cascade stages and in outgoing flows. The nonstationary hydraulic process generates a nonstationary separation process, in the course of which a change takes place in the isotope composition of the process gas in the cascade stages and flows. In all nonstationary processes, equipment safety should be ensured and separation work losses should be minimized, which determines the importance of their investigation. Moreover, compared to the gas diffusion, GC cascades have a smaller holdup and, consequently, a smaller inertia. Small inertia leads to an increase in the influence of nonstationary processes on the performance of cascades. This could be especially detrimental to the operation of GC cascades for separating MIMs, which, unlike cascades for uranium isotope separation, have much smaller volumes of equipment and differ in regulating elements in interstage communications and in external flows.

In this connection, the solution of the problem of full-scale account of nonstationary processes in separating MIMs is topical. The experimental approach to the solution of this problem is rather costly and requires additional equipment for investigations. Therefore, it is expedient to study nonstationary processes by their mathematical modeling. To date a number of works have been done on these

lines, which aimed mainly at constructing mathematical models of nonstationary hydraulic and separation processes in GC cascades for separating binary mixtures. For instance, in [1, 2] we presented models of simultaneous calculations of nonstationary hydraulic and separation processes in GC cascades for uranium isotope separation.

Nonstationary separation processes in cascades for separating MIMs have been the subject of many works [3–7]. In [3], the system of differential equations in partial derivatives describing the nonstationary separation processes was replaced by a system of ordinary differential equations (by replacing the spatial derivatives with symmetric finite-difference relations), which is solved by the Runge–Kutta method [8]. A disadvantage of the mathematical model of [3] is a small integration step for providing stability of the solution, which leads to an increase in the computing time. To reduce the computing time, the mathematical models of [4–7] used a numerical method for solving differential equations, which is based on the approximation of differential equations in partial derivatives by finite difference relations and averaging over two adjacent time layers in the obtained relations analogously to the Dufort–Frenkel method [8].

A disadvantage of the models of [3–7] is the limited field of application: modeling is only possible for the case of stationary hydraulic parameters of the GC cascade. These models cannot be used for simultaneous calculations of nonstationary hydraulic and separation processes. To avoid the above disadvantages, we developed a mathematical model of the nonstationary hydraulic processes proceeding in the GC cascades in the process of MIM separation described in detail in [9]. In this model, we used the numerical solution method based on replacing differential equations with difference equations by the implicit Euler scheme [8], which permitted reducing the computing time compared to the use of the explicit Euler–Cauchy scheme with linearization of increments of functions [8] in [1] and the implicit Euler scheme with scaling [8] in [2]. The given model was tested for separation of Si, Xe, W, Ni isotopes. It has been shown that it adequately describes nonstationary hydraulic processes. The deviation of

calculated and real values of the hydraulic parameters of GC cascade does not exceed 7,5%.

Further works were aimed at developing a mathematical model of the nonstationary separation processes proceeding in the GC cascade for MIM separation. The present paper is devoted to its description.

## 2.1 Description of the Mathematical Model of Nonstationary Separation Processes. Basic Parameters of the Stage and the Cascade

MIM separation occurs in the GC cascade. The MIM (process gas) contains  $m$  components identified by index  $i$  ( $i = \overline{1; m}$ ). The cascade consists of  $K$  stages (Fig. 1) identified by index  $j$  ( $j = \overline{1; K}$ ). The feed flow  $F$  is conveyed into the cascade and the flows of the light  $P$  and heavy  $W$  fractions are withdrawn. The feed flow is conveyed into the stage with index  $K_F$ , the heavy fraction flow is withdrawn from the first stage, and the light fraction flow is withdrawn from the stage  $K$ .

The separation stage consists of  $N$  GCs connected in parallel. The feed flow  $G_{Fj}$  is conveyed into the stage and flows of the light  $G_{Pj}$  and the heavy  $G_{Wj}$  fractions are withdrawn (Fig. 2). The concentrations of the  $i$ -th component in the feed flow and in the flows of the light and heavy fractions of the  $j$ -th stage are denoted by  $G_{Fji}$ ,  $G_{Pji}$ , and  $G_{Wji}$ , respectively. The heavy fraction of the first stage or the light fraction of the  $K$ -th stage can be partly supplied by the swirling flow of the heavy fraction  $G_{zakW}$  (or by the swirling flow of the light fraction  $G_{zakP}$ ) to the feed of the first stage (or the  $K$ -th stage), respectively.

Stage flows and concentrations of elements in them in the stationary hydraulic regime are related by the balance equations of the process gas and of each component (isotope) in the stage (in the absence of corrosion loss of the process gas):

$$G_{Fj} = G_{Pj} + G_{Wj}, \quad (2.1)$$

$$G_{Fj} C_{Fji} = G_{Pj} C_{Pji} + G_{Wj} C_{Wji}, \quad (2.2)$$

The sum of concentrations of components for any flow is equal to unity.

The separation of components in the stage is defined by the expression

$$\chi_{jik} = \frac{C_{Pji} C_{Wjk}}{C_{Pjk} C_{Wji}}, \quad (2.3)$$

$$\chi_{jik} = \chi_{0j}^{M_i - M_k}, \quad (2.4)$$

where  $\chi_{jik}$  is the separation factor of the  $i$ -th and  $k$ -th components in the  $j$ -th stage;  $\chi_{0j}$  is the separation factor per unit difference of mass numbers;  $M_i, M_k$  are the mass numbers of the  $i$ -th and  $k$ -th components, respectively.

Cascade flows in the stationary hydraulic regime are related by the balance equations

$$F = P + W, \quad (2.5)$$

$$FC_{Fi} = PC_{Pi} + WC_{Wi}. \quad (2.6)$$

## 2.2 Section of the model

The method for calculating the nonstationary separation processes is based on the following statements:

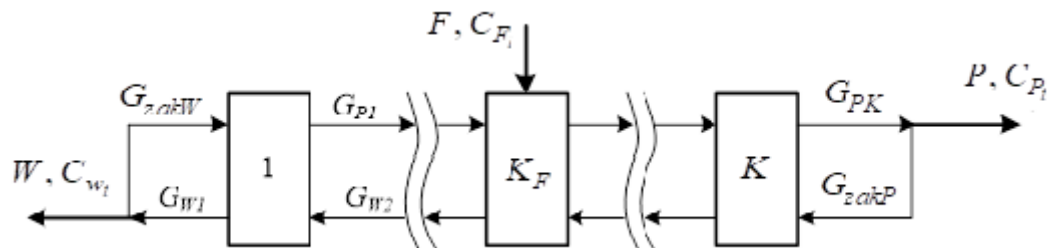


Fig. 1. Separation cascade

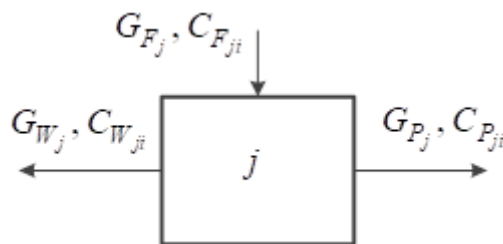


Fig. 2. Separation stage



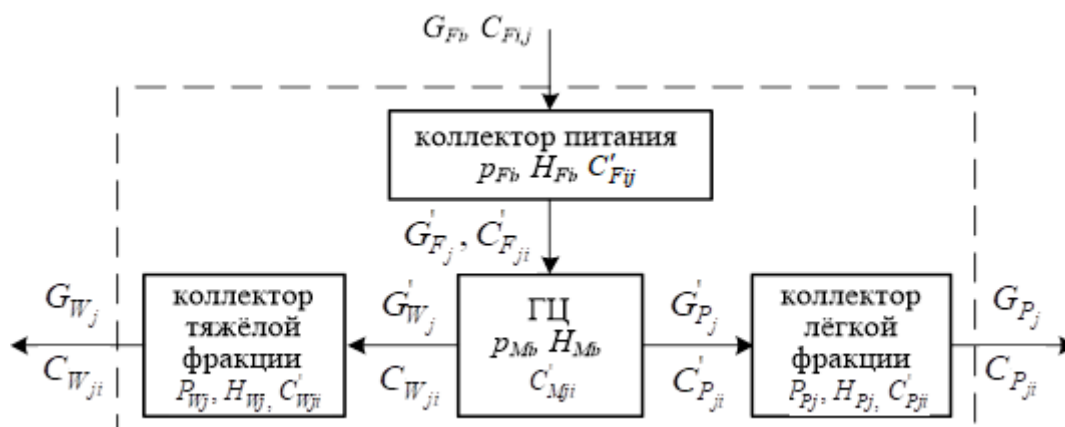


Fig. 3. Sections of the  $j$ -th stage.

- 1) each stage of the cascade has a finite number of sections in which the process gas is contained [9];
- 2) at any instant of time the values of the temperature, process gas pressure, and concentration of the  $i$ -th component are equal at each point of the section;
- 3) the basic equations of the model are the balance equations of the process gas and components in each section and the equation of separation of MIMs in the GC.

Each section is characterized by the following quantities: volume  $V$ ; pressure  $p$  of the process gas in the section;  $i$ -th component concentration  $C_i$ ; physical properties of the process gas (molar mass  $\mu$ , dynamic viscosity  $\eta$ , temperature  $T$ ); mass of the process gas inside the section (holdup)  $H$ , whose value is determined by the quantities  $V$ ,  $p$ ,  $\mu$ , and  $T$ . As a result, the cascade holdup is considered to be concentrated in  $4S$  sections:  $S$  sections of the GC stage;  $S$  manifolds of the stage feed;  $S$  manifolds of the light fraction of the stage;  $S$  manifolds of the heavy fraction of the stage (Fig. 3).

The flow  $G_{Fj}$  with concentration  $C_{Fji}$  entering the stage passes into the feed manifold, where pressure  $p_{Fj}$  is produced. The flow  $G'_{Fj}$  with  $i$ -th component concentration  $C'_{Fji}$  passes from the feed manifold into the GC, where it is separated into flows  $G'_{Pj}$  and  $G'_{Wj}$  with concentrations  $C'_{Pji}$  and  $C'_{Wji}$  entering the manifolds of the light and heavy fractions, respectively, from which the flows  $G_{Pj}$  and  $G_{Wj}$  with concentrations of the  $i$ -th component  $C_{Pji}$  and  $C_{Wji}$ , respectively, go out. In the

heavy fraction manifold, pressure  $p_{Wj}$  is produced, and in the light fraction manifold, pressure  $p_{Pj}$  is produced. The concentration  $C_{Fji}$  in the flow is determined by the expression

$$G_{Fj} = \begin{cases} \delta_j F + G_{zakW} + G_{Wj+1}, & j = 1 \\ \delta_j F + G_{Pj-1} + G_{Wj+1}, & j = \overline{2; K-1} , \\ \delta_j F + G_{Pj-1} + G_{zakP}, & j = K \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\delta_j = \begin{cases} 1, & j = K_F , \\ 0, & j \neq K_F \end{cases} \quad (2.8)$$

where  $\delta_j$  is the Kronecker symbol characterizing the presence of the external feed flow  $F$  into the  $j$ -th stage. The rotation frequency of GC rotors and the temperature operating conditions of the equipment are assumed to be constant.

### 2.3 Basic equations describing the nonstationary processes

The basic equations of the nonstationary hydraulic process are the balance equations of the process gas in the above sections [9]:

$$\begin{cases} \frac{dH_{Fj}}{dt} = G_{Fj} - G'_{Fj} \\ \frac{dH_{Mj}}{dt} = G'_{Fj} - G'_{Pj} - G'_{Wj} \\ \frac{dH_{Pj}}{dt} = \begin{cases} G'_{Pj} - G_{Pj}, & j = \overline{1; K-1} . \\ G'_{Pj} - P - G_{zakP}, & j = K \end{cases} \\ \frac{dH_{Wj}}{dt} = \begin{cases} G'_{Wj} - W - G_{zakW}, & j = 1 \\ G'_{Wj} - G_{Wj}, & j = \overline{2; K} \end{cases} \end{cases} \quad (2.9)$$

The basic equations of the nonstationary separation process are the balance equations of the process gas and components (isotopes) in the above sections:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(H_{Mj} C_{Mji})}{dt} = G'_{Fj} C'_{Fji} - G'_{Pj} C'_{Pji} - G'_{Wj} C'_{Wji} \\ \frac{d(H_{Fj} C'_{Fji})}{dt} = G_{Fj} C_{Fji} - G'_{Fj} C'_{Fji} \\ \frac{d(H_{Wj} C_{Wji})}{dt} = \begin{cases} G'_{Wj} C'_{Wji} - (W + G_{zakW}) \cdot C_{Wji}, & j = 1 \\ G'_{Wj} C'_{Wji} - G_{Wj} C_{Wji}, & j = \overline{2; K} \end{cases} \\ \frac{d(H_{Pj} C_{Pji})}{dt} = \begin{cases} G'_{Pj} C'_{Pji} - G_{Pj} C_{Pji}, & j = \overline{1; K-1} \\ G'_{Pj} C'_{Pji} - (P + G_{zakP}) \cdot C_{Pji}, & j = K \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

The problem of calculating the nonstationary separation processes is reduced to the solution of the system of first-order differential equations (2.10) with initial conditions (concentrations of components at the initial instant of time). The quantities of flows and holdup of stages entering into the equations are derivatives of the function of time. These facts make the analytical solution of the formulated problem in the general case impossible.

#### 2.4 Solution Algorithm for Nonstationary Separation Equations

Let us consider a section with holdup  $H$  and concentration of the  $i$ -th component  $C_i$ . The total flow  $G_{in}$  with weighted-mean concentration  $C_{ini}$  is fed into it, the total flow  $G_{out}$  with weighted-mean concentration  $C_i$  is withdrawn from it. The differential equations entering into system (2.1) describing the nonstationary hydraulic processes in a given section can be written in general form as

$$\frac{dH}{dt} = G_{in} - G_{out}. \quad (2.11)$$

The values of the holdup and flows are determined from the numerical solution of the differential equations of the form (2.1) by the algorithm described in [9].

The differential equations entering into system (2.10) describing the nonstationary separation processes in a given section are written in general form as follows:

$$\frac{d(HC_i)}{dt} = G_{in} C_{ini} - G_{out} C_i. \quad (2.12)$$

Replacing the derivatives by difference equations according to the implicit Euler scheme [8] and considering Eq. (2.12) on the  $b$ -th time layer at time  $t^{(b)}$ , we obtain

$$\frac{H^{(b)}C_i^{(b)} - H^{(b-1)}C_i^{(b-1)}}{\Delta t} = G_{in}^{(b)}C_{ini}^{(b)} - G_{out}^{(b)}C_i^{(b)}, \quad (2.13)$$

$$\Delta t = t^{(b)} - t^{(b-1)}. \quad (2.14)$$

where  $\Delta t$  defines the time step in  $s$ , and  $b$  is the time layer index. Having written the expressions of the form (2.14) for all sections of each stage of the cascade and expressing component concentrations in the flows and sections of the stage in terms of their concentration in the light fraction flow in the GC, we obtain a system of linear algebraic equations with respect to the concentration of the  $i$ -th component in the light fraction flow in the GC. Knowing the concentrations of the previous  $(b - 1)$ -th time layer (in the instant of time  $t^{(b-1)}$ ), we solve the obtained system of algebraic equations by the Gauss method [8] and find the concentrations of components in the light fraction flow in the GC at the instant of time  $t^{(b)}$ . For the initial approximation on the  $k$ th time layer, the values of concentrations on the  $(b - 1)$ -th time layer are used.

Thus, the simultaneous calculation of the nonstationary hydraulic and separation processes is reduced to determining the hydraulic parameters of the cascade by the algorithm described in [9], replacing first-order differential equations of nonstationary separation with difference equations, formulating and solving obtained systems of linear algebraic equations, and finding the values of concentrations of components in all sections and flows on each time layer satisfying the balance equation of the  $i$ -th component in the cascade:

$$\left| \frac{(F^{(b)} - P^{(b)} - W^{(b)}) \cdot \Delta t}{H'^{(b)} - H'^{(b-1)}} - 1 \right| \leq \sigma_G, \quad (2.15)$$

$$\left| \frac{(F^{(b)}C_{Fi}^{(b)} - P^{(b)}C_{Pi}^{(b)} - W^{(b)}C_{Wi}^{(b)}) \cdot \Delta t}{H'^{(b)}C_{Hi}^{(b)} - H'^{(b-1)}C_{Hi}^{(b-1)}} - 1 \right| \leq \sigma_S, \quad (2.16)$$

$$H^{(b)} = \sum_{j=1}^K \left[ H_{Mj}^{(b)} + H_{Fj}^{(b)} + H_{Wj}^{(b)} + H_{Pj}^{(b)} \right], \quad (2.17)$$

$$C_{Hi}^{(b)} = \frac{1}{H^{(b)}} \sum_{j=1}^K \left[ H_{Mj}^{(b)} C_{Mji}^{(b)} + H_{Fj}^{(b)} C_{Fji}^{(b)} + H_{Wj}^{(b)} C_{Wji}^{(b)} + H_{Pj}^{(b)} C_{Pji}^{(b)} \right], \quad (2.18)$$

where  $C_{Hi}$  is the weighted-mean concentration of the  $i$ -th component in the cascade holdup.

The above algorithm was realized in the form of the program product developed in Delphi in the Embarcadero Delphi XE2 medium.

## 2.5 Results of the Calculation of the Cascade for Germanium Isotope Separation

To verify the developed mathematical model and the program product, we calculated the parameters of the separation process proceeding in the model cascade of the GC for germanium isotope separation. For comparison of the results with those obtained previously in [6, 7], a constant width cascade (CWC) having equal output of all separation stages has been considered. For the process gas, germanium tetrafluoride  $\text{GeF}_4$  ( $\mu \sim 0.149$  kg/mole) was used. In the CWC, the  $G_F$  value in the stationary regime was assumed constant for all stages of the cascade. By analogy with [6, 7] the following dimensionless parameters of the cascade were introduced:

$$\tau = \frac{G_F \varepsilon_0^2 t}{H}, \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_0 = \ln \chi_0, \quad (2.20)$$

$$y_P = \varepsilon_0 S, \quad (2.21)$$

The isotope composition of natural germanium (cascade feed flow) was assumed to be as follows:  $^{70}\text{Ge} - 20,84\%$ ,  $^{72}\text{Ge} - 27,54\%$ ,  $^{73}\text{Ge} - 7,73\%$ ,  $^{74}\text{Ge} - 36,28\%$ ,  $^{76}\text{Ge} - 7,61\%$ ; the CWC parameters were assumed to be  $y_P = 9$ ,  $y_F = 4,5$ ,

$$\frac{\varepsilon_0 G_F}{P} = 2, \quad \frac{\varepsilon_0 G_F}{W} = 2.$$

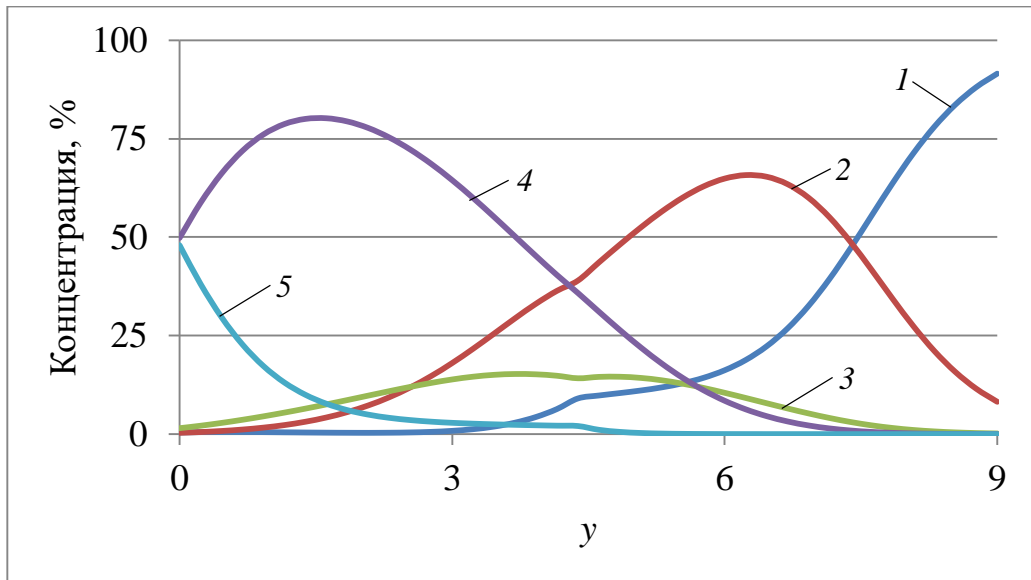


Fig. 1 Concentrations of germanium isotopes by the steps of the GC cascade after its filling  $\text{GeF}_4$ : 1 –  $^{70}\text{Ge}$ , 2 –  $^{72}\text{Ge}$ , 3 –  $^{73}\text{Ge}$ , 4 –  $^{74}\text{Ge}$ , 5 –  $^{76}\text{Ge}$

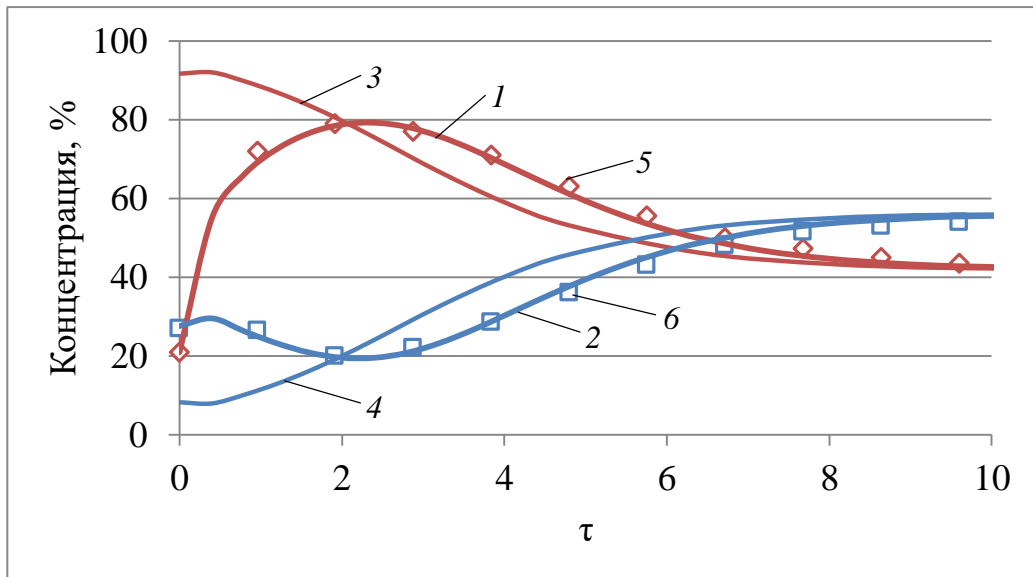


Fig. 2 The dependence of the concentration of germanium isotopes in the flow of the light fraction of the GC cascade on time: 1, 2 – our model for the initial state 1, 3, 4 – our model for the initial state 2, 5, 6 – model [6, 7] for the initial state 1; 1, 3, 5 –  $^{70}\text{Ge}$ , 2, 4, 6 –  $^{72}\text{Ge}$

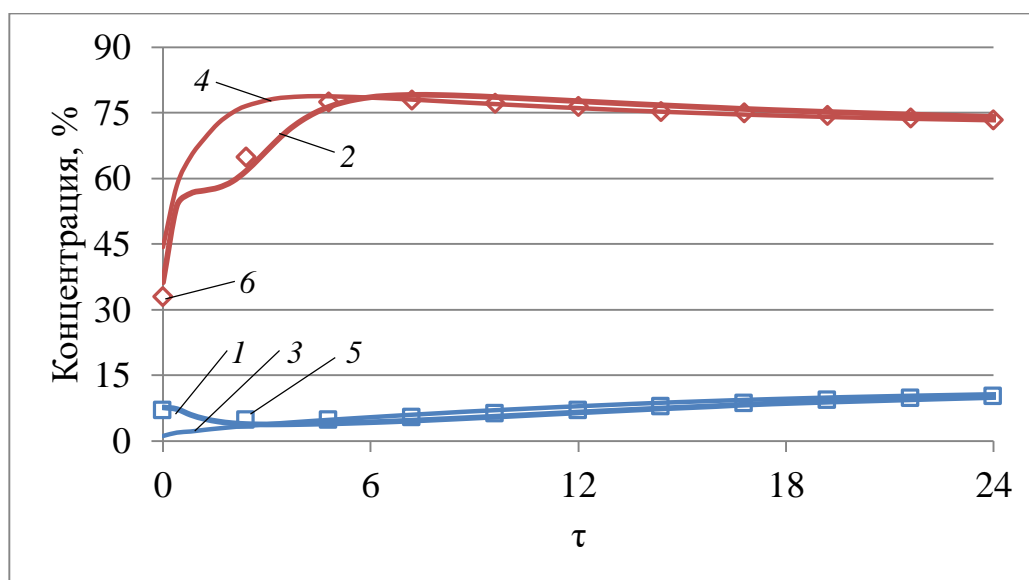


Fig. 3. The dependence of the concentration of germanium isotopes in the flow of the heavy fraction of the GC cascade on time: 1, 2 – our model for the initial state 1, 3, 4 – our model for the initial state 2, 5, 6 – model [6, 7] for the initial state 1; 1, 3, 5 –  $^{73}\text{Ge}$ , 2, 4, 6 –  $^{74}\text{Ge}$

The nonstationary process was arbitrarily divided into the following components:

1. Filling of the cascade with the process gas, as a result of which the hydraulic parameters increase to the stationary value, accompanied by the separation process of isotopes and their distribution along the cascade length.

2. Accumulation, when at practically constant hydraulic parameters the concentrations of components in the cascade stages and flows change to stationary values.

3. We have calculated the parameters of the nonstationary separation processes in the CWC for two initial states:

4. The hydraulic parameters of the cascade correspond to stationary parameters, the concentrations of isotopes in all stages are equal to their concentrations in the feed flow [6, 7] (initial state 1).

5. The hydraulic parameters and concentrations of isotopes in the stages are the result of the calculation of the nonstationary process of filling the cascade with

the process gas (initial state 2).

The calculation data on the distribution of germanium isotopes along the cascade length upon its filling with the process gas are presented in Fig. 4. Figures 5 and 6 present our calculated values of germanium isotope concentrations in the flows of the light and heavy fractions of the cascade, as well as, for comparison, the results of calculations made by other authors [6, 7] at the initial state 1.

As is seen from Fig. 4, in the process of filling the cascade with the process gas, separation of isotopes occurs. As a result, isotopes are distributed along the cascade length in accordance with their mass numbers: at the point of withdrawal of the heavy fraction ( $i = 1$ )  $^{76}\text{Ge}$  is concentrated, in the middle part of the cascade – isotopes  $^{70}\text{Ge}$ ,  $^{73}\text{Ge}$ , and  $^{74}\text{Ge}$ , at the point of withdrawal of the light fraction ( $j = K$ ) –  $^{70}\text{Ge}$ . Such a distribution of isotopes upon filling the cascade corresponding to the initial state 2 strongly influences both the character of the change in the values of concentrations of isotopes during the subsequent nonstationary process and its duration (curves 3 and 4 in Fig. 5 and curve 2 in Fig. 6).

The results of calculations with the use of the model developed by us for the initial state 1 (curves 1 and 2 in Fig. 4, Curve 1 in Fig. 6) correlate with the data of [6, 7], which points to the adequacy of the developed mathematical model. The character of the change in concentrations in the course of the nonstationary process depends on the initial state (concentrations of isotopes in the cascade stages at  $\tau = 0$ ).



## Conclusions

1. Using the developed mathematical model, numerical studies of the non-stationary process of separation of germanium isotopes in a cascade of constant width with its filling with working substance and accumulation of isotopes to stationary values with almost constant hydraulic parameters of cascades were carried out.

2. It is shown that in the process of filling the separation of germanium isotopes occurs. After the cascade is filled, germanium isotopes are distributed in stages of the cascade in accordance with their mass numbers. The greatest change in the concentration of germanium isotopes takes place at the end steps of the cascade, the smallest change is near the feed flow supply stage.

3. It is shown that the results of numerical simulation of the separation of germanium isotopes are in good agreement with the data of other authors for the case when the hydraulic parameters of the cascade correspond to stationary (state 1). The nature of changes in the concentration of germanium isotopes during a nonstationary process depends on the initial state of the cascade. The duration of the non-stationary process in the case of the calculation from the initial state 2 is less than when calculated from the initial state 1.

The revealed regularities of non-stationary separation of germanium isotopes will contribute to the development of the theory of separation of multicomponent isotopic mixtures and can be used to optimize the separation of these isotopes in JSC "PAE", Zelenogorsk.

## References

1. S. V. Filimonov, G. M. Skorynin, A. A. Orlov, and D. N. Goldobin, Modeling of nonstationary hydraulic processes in industrial gas centrifuge cascades for uranium enrichment, *Izv. Tomsk. Politekh. Univ.*, 309, No. 3, 85–88 (2006).
2. A. A. Orlov, S. N. Timchenko, and V. S. Sidorenko, Mathematical model of nonstationary hydraulic process occurring in gas centrifuges for uranium enrichment, *Adv. Mater. Res.*, 1084, 673–677 (2015).
3. E. V. Levin, N. I. Laguntsov, and G. A. Sulaberidze, A method of numerical investigation of nonstationary processes in cascades for separation of multicomponent isotope mixtures, *J. Eng. Phys.*, 43, No. 3, 456–462 (1982).
4. V. M. Vetcko, O. A. Devdariani, E. V. Levin, G. A. Sulaberidze, and G. L. Parcachishvili, Modeling of transient processes in cascades for separation of stable isotope multicomponent mixtures, *Isotopenpraxis*, 18, No. 8, 288–293 (1982).
5. V. M. Vetcko, N. I. Laguntsov, B. I. Nikolaev, and G. A. Sulaberidze, Transient processes in cascades for separation of multicomponent isotope mixtures, *At. Énerg.*, 63, No. 3, 184–188 (1987).
6. N. I. Laguntsov, E. V. Levin, B. I. Nikolaev, and G. A. Sulaberidze, Some features of transient processes in separation of multicomponent isotope mixtures, *At. Énerg.*, 62, No. 6, 394–398 (1987).
7. G. A. Sulaberidze, V. A. Palkin, V. D. Boricevich, V. D. Borman, and A. V. Tichomirov, *Theory of Cascades for Separation of Binary and Multicomponent Isotope Mixtures* [in Russian], MEPhI, Moscow (2011).
8. U. G. Pirumov, *Numerical Methods* [in Russian], Drofa, Moscow (2003).
9. A. A. Orlov, V. P. Sovach, and A. A. Ushakov, Mathematical model of nonstationary hydraulic processes occurring in gas centrifuge cascade for separation of multicomponent isotope mixtures, *Altern. Energy Ecol.*, 23, No. 187, 45–50 (2015).