

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УДК 51-7:004.92:519.6

**Перинская Елена Владимировна**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ  
ПАРАМЕТРОВ АППАРАТОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ПРОЦЕСС  
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ (технические науки)»

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор,  
Павлыш В. Н.

Идентичность всех экземпляров  
ПОДТВЕРЖДАЮ  
Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.024.04  
канд.тех.наук

Т.В. Завадская

Донецк – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ СМЕСИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	16
1.1 Теоретические предпосылки и технологическая реализация процесса механического обезвоживания угольных шламов при обогащении угля	16
1.1.1 Постановка задачи модификации технологии и параметров процесса	16
1.1.2 Анализ результатов исследований механического обезвоживания шламовых осадков	17
1.2 Исследование гидродинамических характеристик осадков углеобогащения	27
1.3 Имитационное моделирование структуры осадков при механическом воздействии	29
1.4 Результаты анализа теории и технологии процессов. Цель и задачи исследования.	34
1.5 Выводы по разделу 1	37
РАЗДЕЛ 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТА С ОДНОЛОПАСТНЫМ КОНВЕКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ	38
2.1 Физико-техническая постановка задачи математического моделирования процесса функционирования однолопастного конвективного аппарата	40
2.2 Принцип построения математической модели	41
2.3 Математическое моделирование процесса	42

2.3.1 Разработка математических моделей	42
2.3.2 Построение математических моделей и формирование краевых задач	43
2.3.3 Численное решение краевых задач с использованием метода конечных разностей	46
2.4 Программы моделирования и численные результаты.	48
2.4.1 Описание программ	51
2.4.1.1 Модель (1-D).	51
2.4.1.2 Модель (2-D), программа SILITE	51
2.4.1.3 Модель(2-Dcyl)	51
2.4.1.4 Модель (2-Dxy)	52
2.4.2 Результаты компьютерного моделирования	57
2.4.2.1 Исследование влияние координат входных трубопроводов	57
2.4.2.2 Исследование влияния скорости вращения лопасти	58
2.4.2.3 Исследование влияния координат расположения лопасти	58
2.5 Исследование влияния дополнительных конструкций при модернизации аппаратуры	59
2.6 Выводы и рекомендации по использованию результатов математического моделирования.	60
2.7 Выводы по разделу 2	61
<b>РАЗДЕЛ 3 РАСШИРЕНИЕ ПАКЕТА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ</b>	63
3.1 Аппроксимация математической модели процесса путём редукции краевой задачи к системе критериальных	64

зависимостей.	
3.2 Оценки эффективности воздействия в зависимости от параметров.	69
3.2.1 Критерии оценки эффективности	69
3.2.2 Исследование эффективности процесса в зависимости от параметров технологической схемы	71
3.2.2.1 Влияние скорости вращения лопасти	71
3.2.2.2 Влияние положения лопасти	72
3.3 Обоснование структуры системы автоматизированного проектирования (САПр)	73
3.4 Выводы по разделу 3	78
<b>РАЗДЕЛ 4 ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ СМЕСИ</b>	<b>79</b>
4.1 Назначение и структура системы автоматизированного управления процессом	79
4.2 Элементная база системы управления	84
4.3 Основные параметры элементов и способы их совершенствования	90
4.3.1 Синтез автомата с преобразователем адреса микрокоманд	90
4.3.2 Синтез автомата с дополнительной схемой адресации	101
4.3.3 Синтез автомата с дополнительной схемой адресации и преобразователем адреса микрокоманд	111
4.3.4 Рекомендации по применению и дальнейшему развитию теоретических основ процессов конвективного	121

воздействия на многокомпонентные материалы	
4.4    Выводы по разделу 4	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А Копия акта о внедрении результатов научных разработок в производственно-технологическом отделе ООО «Славен»	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Копия справки о внедрении результатов исследований в учебный процесс	152

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Технология изготовления ряда необходимых материалов предусматривает их получение из влажных неоднородных субстанций, перемешиваемых в процессе производства.

На многих предприятиях в составе технологического оборудования эксплуатируются машины и аппараты, содержащие узлы конвективного типа, а именно устройства, осуществляющие перемешивание неоднородных материалов, состоящих из жидкой и твердой фазы (технологические линии химических производств, предприятия строительных материалов, технологические процессы обогащения полезных ископаемых и т. п.). При этом качество конечного продукта во многом зависит от эффективности работы конвективных узлов.

В частности, конструкцией ряда электронных приборов предусмотрено применение узлов, основанных на изделиях из марганец-цинковых ферритовых порошков. Применяемый для их получения реактор-осадитель не позволяет получать осадки с хорошо воспроизводимыми свойствами без его реконструкции, т.к. в реакторе не достигается необходимая степень однородности компонентов в осадке, происходит залегание твердой фазы на днище, наблюдается налипание осадков на стенках. Реконструкция аппарата требует соответствующего обоснования, что вызывает необходимость теоретических и экспериментальных исследований.

Аналогичные проблемы требуют решения при проектировании машин, изготавливающих бетонные смеси, конструировании технологических линий, осуществляющих подготовку увлажнённых масс обогащённого угля, и в других отраслях.

Таким образом, стоит общая проблема расчета оптимальных параметров рассматриваемых аппаратов, что непосредственно связано с важной практической задачей повышения производительности и качества продукции.

Кардинальным направлением решения этой проблемы является применения математического моделирования с использованием современных моделей и компьютерных технологий.

В этой связи разработка детерминированных математических моделей процессов функционирования аппаратов, содержащих узлы конвективного типа, и обоснование с их применением эффективных параметров оборудования является актуальной научно-технической задачей, имеющей отраслевое значение.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами совершенствования технологии и методов исследования процессов и аппаратов посвящены работы ряда отечественных и зарубежных авторов. Большой вклад в решение проблемы внесли работы, выполненные под руководством академика В.В. Кафарова (Бирюков Д.П., Дорохов И.Н., Еременко В.В. и др.), где рассмотрены конструкции аппаратов и методы расчета параметров, теоретические и технологические основы процессов.

Вместе с тем, остается ряд нерешенных задач в области оптимизации параметров и совершенствования конструкций аппаратов. Одним из эффективных методов решения рассматриваемых задач является метод математического моделирования, позволяющий получить с помощью компьютерных технологий достаточно широкий набор данных о реконструируемом объекте без проведения долговременных и дорогостоящих натурных исследований.

**Целью работы** является совершенствование математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств для исследования процессов и обоснования параметров технологических систем, содержащих узлы конвективного типа.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены **следующие задачи:**

- выполнить анализ технологических схем и процессов

функционирования оборудования, осуществляющего перемешивание многокомпонентных смесей с целью определения особенностей протекания процессов и определения параметров, влияющих на качество конечной продукции;

- разработать математические модели и провести компьютерные исследования процессов в условиях вариации технологических параметров;
- проанализировать математические модели и провести моделирование процессов в условиях применения конструктивных модификаций оборудования;
- систематизировать результаты моделирования технологии и разработать алгоритмы обоснования параметров процессов, обеспечивающих повышение эффективности работы оборудования;
- разработать рекомендации по модернизации параметров технологических процессов и оборудования;
- разработать методы инженерного расчёта параметров процесса для обеспечения оперативной оценки их значений при проектировании;
- разработать структуру системы автоматизированного проектирования оборудования и технологии процессов конвективной обработки многокомпонентных материалов;
- разработать рекомендации для практического применения результатов работы в области производства многокомпонентных материалов методом конвективного воздействия.

**Объект исследований** – процессы функционирования оборудования, осуществляющего производство продукции из многокомпонентных смесей способом конвективной обработки.

**Предмет исследований** – математические модели, вычислительные методы и алгоритмы компьютерного исследования процессов, направленные на модификацию параметров оборудования.

**Идея работы** состоит в использовании особенностей протекания процессов конвективной диффузии, происходящих при осуществлении перемешивания многокомпонентных неоднородных материалов, для обоснования модификации параметров, обеспечивающих повышение эффективности производства.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе применен комплексный метод, включающий в себя: анализ и обобщение данных исследований процессов конвективного перемешивания и методов расчета параметров оборудования; математическое моделирование процессов на основе детерминированных математических моделей; теоретическое обоснование путей повышения эффективности процессов за счет модификации параметров; компьютерные эксперименты для исследования и обоснования параметров процессов.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена в соответствии с тематическими планами Донецкого национального технического университета и является частью исследований, в которых автор принимала участие как исполнитель: гостемы Н-19-10 «Разработка и исследование математических моделей и прикладного программного обеспечения для компьютерного моделирования и расчета параметров сложных динамических систем», № Государственной регистрации 0113U000955; гостемы Н-25-05 «Исследование процессов, разработка математических моделей, прикладного и системного программного обеспечения для моделирования и расчета параметров динамических систем»; гостемы Н-18-15 «Исследование и разработка математических моделей и программного обеспечения для моделирования и расчёта параметров динамических систем»; гостемы Н-20-18 «Исследование процессов, разработка математических моделей и программного обеспечения для компьютерного моделирования и расчёта параметров сложных динамических систем».

## Научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

### Научная новизна:

- Впервые разработана детерминированная математическая модель процесса принудительной конвекции неоднородных смесей, в основу которой положены уравнения математической физики. Использование новой модели позволяет определить влияние основных параметров оборудования на качество продукции.
- Впервые обоснован выбор и выполнена модификация вычислительных методов для компьютерной реализации модели с учётом технологических параметров оборудования.
- Обоснованы направления совершенствования параметров оборудования для повышения качества конечного продукта.
- Получила дальнейшее развитие теория проектирования аппаратов, осуществляющих процессы перемешивания многокомпонентных смесей как основу для производства новой технологической продукции в виде композиции исходных материалов.

### **Практическая ценность:**

- Разработаны алгоритмы и пакеты прикладных программ для компьютерной реализации предложенной детерминированной математической модели процесса принудительного перемешивания неоднородных смесей, что позволяет исследовать параметры функционирования аппаратов конвективного типа в различных отраслях производства.
- На основании результатов вычислительного эксперимента обоснованы значения усовершенствованных параметров аппарата для получения ферритового порошка с целью устранения выявленных недостатков существующих агрегатов.

Результаты исследований имеют широкий спектр применения для различных предметных областей. Предложенная практическая реализация разработанной модели позволяет формировать базы данных о возможных наборах параметров оборудования для использования в системах автоматизированного управления и проектирования, что может послужить функциональным дополнением и развитием информационных систем различных предприятий и организаций.

**Теоретическая значимость работы состоит в том, что обоснованная методика построения детерминированной математической модели, основанной на уравнениях в частных производных, отражающих физику процессов, происходящих в неоднородной сплошной среде при конвективном воздействии механических устройств, является новым эффективным теоретическим инструментом исследования технологических процессов без проведения долгосрочных дорогостоящих промышленных экспериментов. Предложенный подход в дальнейшем может быть расширен и дополнен функциями автоматического управления и автоматизированного проектирования для повышения качества выходной продукции, а также позволяет ставить и решать большой спектр статистических и математических расчетных задач, связанных с принятием решений, имеющих место в технологических системах. Развитие данной разработки может осуществляться путем дополнения ее новыми решениями в области аналитического и численного анализа технологических схем, усовершенствования методов организации и управления специализированными производствами.**

**Практическая значимость полученных результатов** заключается в том, что результаты исследований имеют широкий спектр применения для различных предметных областей. Предложенная практическая реализация разработанной модели позволяет формировать базы данных о возможных наборах параметров оборудования для использования в системах автоматизированного управления и проектирования, что может послужить

функциональным дополнением и развитием информационных систем различных предприятий и организаций.

**Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Установлено, что основное влияние на процесс конвективного перемешивания многокомпонентных материалов оказывают как геометрические (координаты установки элемента вращения, координаты расположения входных трубопроводов для поступающих компонентов), так и технологические параметры (скорость вращения конвективного элемента).

2. Показано, что обоснованные методы модификации параметров оборудования способствуют повышению эффективности процесса и качества получаемых материалов.

**Степень достоверности и обоснованности результатов, положений и выводов** обеспечивается корректным использованием результатов исследований, имеющих широкий спектр применения для различных отраслей, использующих процессы принудительной конвекции неоднородных смесей; предложенная практическая реализация результатов математического моделирования позволяет рекомендовать способы модификации технологии и параметров, что может послужить новым решением задачи повышения качества продукции, а также развития теории построения систем автоматизации управления процессами и проектирования оборудования.

**Реализация выводов и рекомендаций работы подтверждается:**

– внедрением в практику работы производственно-технологического отдела ООО «СЛАВЕН» (Российская федерация, г. Ростов-на-Дону) математических моделей и рекомендаций по их применению для определения и управления параметрами процессов перемешивания влажных многокомпонентных неоднородных материалов в закрытых аппаратах конвективного типа (акт о внедрении от 12 мая 2019г., протокол технического совещания рабочей группы № 3/05.19 от 12 мая 2019г., справка о внедрении, утверждённая директором предприятия);

– внедрением в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка № 52.1-04/19 от 14.05.2019 об использовании в учебном процессе при чтении лекций и проведении практических занятий на кафедрах «Искусственный интеллект и системный анализ» и «Прикладная математика» по дисциплинам: «Уравнения математической физики», «Математическое моделирование», «Вычислительная математика», «Разностные методы решения краевых задач», «Информационные системы и технологии», «Численные методы», «Математические пакеты прикладных программ»).

### **Апробация результатов диссертации.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VII Международной научно-методической конференции «Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров» в городе Сусс (Тунис) с 08 по 17 октября 2013 г.; IX международной научно-практической конференции «Проблемы горного дела и экологии горного производства» (24-25 апреля 2014 г., г. Антрацит); XXI Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 15 – 20 сентября 2014г.); VIII Международной научно-методической конференции «Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров» в г. Хаммамет (Тунис) с 28 сентября по 5 октября 2014 г.; XXIII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г.; IX Международной научно-методической конференции «Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров» в городе Сухум, 01 – 09 октября 2016 г.

**Личный вклад соискателя** состоит в формулировании цели, задач исследований, основных научных положений и выводов, разработке математических моделей и программного обеспечения для их компьютерной реализации, разработке рекомендаций по практическому применению результатов; основные научные результаты диссертации включают в себя

детерминированные математические модели, достаточно полно учитывающие особенности протекания процессов перемешивания неоднородных материалов, вычислительные методы, алгоритмы и программные комплексы для компьютерной реализации моделей, что впервые позволило получить полное представление о процессах, выявить причины недостатков существующих способов проектирования оборудования, определить направление повышения качества производимой продукции за счёт обоснования новых параметров оборудования; текст диссертации написан автором самостоятельно.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, из них 7 статей в специализированных изданиях, рекомендованных ВАК ДНР и в рецензируемых журналах, 3 в других изданиях (в том числе 2 монографии), результаты прошли апробацию и опубликованы в материалах 6 международных научно-технических конференций. Публикации в достаточной мере отражают содержание работы.

### **Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности.**

Полученные результаты, положения и выводы отвечают требованиям паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)», в частности: п.1 «Разработка новых математических моделей и методов компьютерного моделирования явлений, объектов, систем и процессов»; п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов»; п.5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Тема и содержание диссертации «Математическое моделирование и обоснование параметров аппаратов, осуществляющих процесс перемешивания неоднородных материалов» на соискание ученой степени

кандидата технических наук соответствует паспорту научной специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)», по которой диссертационному совету Д 01.024.04 предоставлено право принимать диссертационные работы к защите.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов и заключения, изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 16 таблиц, список использованной литературы из 129 наименований и 2 приложения на 5 страницах.

## РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
ПРОМЫШЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССОВ  
КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ  
СМЕСИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1      Теоретические предпосылки и технологическая реализация процесса механического обезвоживания угольных шламов при обогащении угля

1.1.1 Постановка задачи модификации технологии и параметров процесса

Повышение эффективности обезвоживания осадков шламовой крупности достигается за счет увеличения скорости удаления жидкости, снижения конечной влажности материала и производственных площадей, занимаемых оборудованием, на котором выполняется обезвоживание, повышения производительности аппаратов, уменьшения их стоимости и в целом затрат на процесс [1]. Многими исследованиями, которые проводились ранее и продолжают выполняться и в настоящее время, установлены направления совершенствования механического обезвоживания путем добавления к пульпе поверхностно-активных веществ, прогревания осадка паром, продувания сжатым воздухом, добавкой специальных присадок, механического воздействия на осадок и другими методами [2, 3, 4, 5].

Проблемы, возникающие при обезвоживании осадков шламовой крупности, остаются актуальными и в настоящее время, особенно в условиях рыночных отношений, когда предприятия стремятся снизить затраты на передел сырья и выпускать продукты, соответствующие требованиям потребителей не только по содержанию горючей массы, но и по влажности. При этом механические методы обезвоживания являются наиболее низкозатратными и достаточно эффективными [6].

Обезвоживание шламовых продуктов обогащения выполняется в две стадии – механическими и термическими (для концентратов) методами. Для этого чаще всего используют фильтрование под действием разницы давлений и сушку. Последний процесс среди всей технологии углеобогащения является наиболее дорогостоящим и экологически небезопасным. В связи с этим отечественные и зарубежные исследования направлены на повышение эффективности механических методов обезвоживания, в ходе которых установлены зависимости скорости удаления влаги от свойств поровой структуры осадков, являющиеся основой теории фильтрации.

При этом существуют проблемы, связанные со строением поровой среды осадков, так как исследование ее представляет собой сложную задачу. Наибольшие трудности возникают при обезвоживании шламовых осадков, имеющих высокоразвитую поверхность частиц, и обусловленные наличием капиллярных явлений, а также особыми свойствами жидкости в тонких каналах.

Исследование структуры осадков на микроуровне позволяет более глубоко понимать сложные явления, протекающие в этой среде, и на этой базе совершенствовать технологию обезвоживания.

Таким образом, исследование и оптимизация параметров, влияющих на повышение скорости фильтрации, является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит снизить влажность товарных продуктов углеобогащения. Важное место в комплексе средств решения данной задачи занимает метод математического моделирования.

### 1.1.2 Анализ результатов исследований механического обезвоживания шламовых осадков

Ввиду отсутствия к настоящему времени обоснованных адекватных детерминированных математических моделей, для исследований применяются экспериментально-аналитические методы, основанные на уже

изученных процессах с применением упрощённых эмпирических зависимостей.

Большинство экспериментаторов применяют классические подходы, уподобляя процесс обезвоживания фильтрации в грунтах. В работах [7, 8,9] рассматривается обезвоживание тонких осадков фильтрованием в фильтр-прессах. В качестве теоретической базы принято известное и широко используемое дифференциальное уравнение Сперри-Кармана:

$$dV/dt = \Delta P / \mu(r_{oc}\alpha V + R_\phi), \quad (1.1)$$

где  $V$  - объем фильтрата, снимаемый с единицы площади фильтровальной поверхности;

$t$  – время фильтрования;

$\Delta P$  – перепад давления по обе стороны фильтрующей перегородки;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости;

$r_{oc}$  – удельное сопротивление слоя осадка единичной толщины;

$\alpha$  – удельный объем осадка;

$R_\phi$  – сопротивление фильтрующей перегородки.

Отмечается, что пористая перегородка делает процесс фильтрации отличным от процесса естественного фильтрования, как это происходит в грунтах. Далее рассматривается основное уравнение фильтрования для несжимаемых и сжимаемых осадков и определяется максимальное давление, при котором можно пренебречь сопротивлением фильтровальной ткани. В приведенных работах указывается на эффективность применения ленточных фильтр-прессов, но отличия работы этого оборудования от камерных прессов не рассматриваются. Следует подчеркнуть, что в таких аппаратах применено приложение сдвиговых деформаций к осадку.

В [7, с.122] показана неудовлетворительная согласованность капиллярной модели течения ньютоновской жидкости через пористую среду, представленную как серию цилиндрических капилляров одинакового размера, с результатами практики. Поэтому предлагается использовать синусоидальную модель пористой среды, когда каждая пора представляется

как канал с чередующимися сужениями и расширениями аналогично четочным капиллярам, и параметры ее описываются уравнением:

$$S = S_{min} (1 + b \sin x) / (1 - b). \quad (1.2)$$

Здесь  $S$  – сужение или расширение поры,

$b$  – параметр поры,

$x$  – расстояние от оси поры.

Параметр  $b$  может быть определен из зависимости:

$$b = (S_{max} - S_{min}) / (S_{max} + S_{min}). \quad (1.3)$$

Исходя из предположения, что максимальный параметр поры должен равняться параметру твердой частицы, определена зависимость для параметра  $b$  в виде:

$$b = (S_p - S_{min}) / (S_p + S_{min}), \quad (1.4)$$

где  $S_p$  – параметр твердой частицы.

Из сопоставления полученных зависимостей с законом Пуазейля автор приходит к выводу, что значение параметра Рейнольдса для течения жидкости в различных по структуре пористых средах отличается только величиной константы, которая зависит от пористости среды, извилистости пор и параметра  $b$ . Последний связан с параметрами твердой фазы и расширениями и сужениями поры.

Однако, в данном цикле работ не уделяется внимания изменению параметров пористой среды при использовании механического воздействия на осадок, каким может быть применение сдвига для интенсификации процесса удаления влаги из осадка.

Авторы работ [10, 11, 12, 13] считают, что в капиллярно-пористом теле растворенные в воде газы могут выделяться внутри пористой среды и снижать ее проницаемость. Поэтому с течением времени проницаемость осадка снижается, и скорость фильтрации не всегда пропорциональна перепаду давлений, как это описывает закон Дарси. В публикациях предложена эмпирическая зависимость изменения проницаемости от времени фильтрования и перепада давления. Исследования показали, что при

перепаде до 1 МПа и времени фильтрования менее 5000с (1час 24мин.) влиянием выделения растворенных газов можно пренебречь. При этом приняты определенные допущения и не рассматриваются более сложные зависимости для сжимаемых осадков.

В работе [14] описана конструкция, принцип действия и результаты экспериментов на осадительно-фильтрующей шнеко-толкающей центрифуге. Приведено уравнение для полного давления, сжимающего осадок в первом периоде центробежной фильтрации, а также выражение для среднего коэффициента проницаемости сжимаемых осадков, показана зависимость интенсивности уплотнения угольных осадков от фактора разделения. Автор приходит к выводу о том, что частицы обезвоженного осадка связаны между собой поверхностными пленками влаги (силами сцепления), что придает осадку определенную прочность, обусловливает его сопротивление сдвигу за счет внутреннего трения и сцепления между частицами скелета осадка. Полное сопротивление сдвигу составляет сумму сил внутреннего трения и сцепления (липкости), действующих на поверхности сдвига. Деформация сдвига в осадке возникает при перемещении его шнеком центрифуги.

Сцепление возникает из-за капиллярного давления жидкости в осадке, которое прижимает частицы друг к другу и создает механическую связь между ними. На сцепление сильно влияют адсорбционные силы, возникающие внутри тончайших пленок, расположенных у поверхности частиц.

В этой же работе сделан вывод о замедлении относительного сжатия осадка угольного концентрата при увеличении фактора разделения в центрифуге выше 200. Следовательно, к осадку необходимо прикладывать другие методы механического воздействия для повышения эффективности его обезвоживания, например сдвиг. Автор предлагает уравнение, с помощью которого можно определять коэффициент сдвига:

$$\operatorname{tg}\psi = \tau / \sigma_n = \operatorname{tg}\varphi (1 + \sigma_0 / \sigma_n), \quad (1.5)$$

где  $\operatorname{tg}\psi$  – коэффициент сдвига;

$\tau$  – сдвигающее напряжение;

$\sigma_n$  – нормальное напряжение;

$\varphi$  – угол трения осадка по стенке ротора;

$\sigma_0$  – липкость осадка.

Вместе с тем в данных работах не учитывается влияние сдвиговых деформаций на скорость обезвоживания осадка.

Цикл работ [15, 16] направлен на определение зависимости кинетики фильтрования от толщины и свойств гидратных пленок на поверхности тонких гидрофильных и гидрофобных частиц. Используя уравнение Кармана и закон Дарси, автор путем определения снижения проницаемости осадка в ходе фильтрации воды оценивает на этой базе изменение толщины гидратной пленки. Это позволило прийти к выводу о возможном структурировании диполей воды на значительном расстоянии от поверхности твердых частиц, благодаря наличию противоионов в гидратном слое. Толщина гидратной пленки может изменяться при введении в раствор различных ионов. Гидрофобный тонкодисперсный антрацит более резко снижал проницаемость, чем гидрофильный дистен. Автор предполагает, что толщина гидратной оболочки на поверхности гидрофобных частиц обусловлена структурированием воды из-за наличия водородных связей между молекулами воды.

Авторы публикаций [17, 18, 19, 20] исследовали удаление влаги из мела прессованием, результатом чего явились экспериментальные кривые зависимости влажности мела от давления. Сделан вывод о том, что количество, диаметр и расположение отверстий для отвода влаги в днище камеры прессования не влияет на кинетику обезвоживания и конечную влажность при соблюдении их суммарной площади.

В работе [19, с. 22] рассматривается уравнение диффузии влаги в трубке постоянного сечения, заполненной пористой средой.

$$\partial C / \partial t = I(x, t) + (D/c) (\partial^2 C / \partial x^2). \quad (1.6)$$

Здесь  $C$  – влажность материала;

$t$  – время;

$I(x, t)$  – функция поглотителей влаги внутри трубы в сечении  $x$  в момент времени  $t$ ;

$D$  – коэффициент диффузии;

$C$  – коэффициент пористости.

При решении данного уравнения авторы приняли допущение о постоянном значении коэффициента диффузии  $D$  и концентрации влаги  $C$  в любом сечении трубы в начальный момент.

Однако, такие допущения справедливы только для узкого диапазона изменения параметров обезвоживания и отдельных частных случаев. Кроме того, делается вывод о том, что удаление влаги происходит в основном за счет прессования осадка мела при нагружении и частично от диффузии влаги, хотя оба эти процесса взаимосвязаны – нагружение и вызывает отчасти перемещение влаги в канале.

Авторы работ [21, 22, 23, 24] отмечают положительное влияние на обезвоживание осадков в осадительных центрифугах типа ОГШ-461Л-01 возможности регулирования соотношения скоростей ротора и шнека. При этом увеличение скорости вращения шнека при обезвоживании высокозольного шлама (отходы обогащения углей марки К) способствовало повышению производительности машины на 30% и мало влияло на влажность осадка при пониженной скорости вращения осадительного ротора. Для флотоконцентрата скорость вращения ротора должна быть повышенной (примерно на 31%), а скорость вращения шнека пониженной от нормальной, что приводит к снижению влажности осадка на 2-3% за счет увеличения времени пребывания осадка в роторе. Но, видимо, не только время пребывания осадка в роторе оказывается положительно.

Авторы работ [25, 26, 27, 28, 29, 30] рассматривают процесс удаления влаги при обезвоживании как переход зернистой среды из суспензионного состояния в осадок, имеющий более плотное сложение, при котором происходит изменение потенциальной энергии среды. При этом

потенциальная энергия суспензии  $E_c$  снижается, а потенциальная энергия осадка  $E_{oc}$  растет до максимального значения [31].

Потенциальная энергия суспензии оценивалась по соотношению [32]:

$$E_c = 0.5 h_c V_c / \delta (1 - m_c). \quad (1.7)$$

Соответственно, потенциальная энергия осадка определялась как:

$$E_{oc} = 0.5 h_{oc} V_{oc} / \delta (1 - m_{oc}). \quad (1.8)$$

Здесь  $h_c, h_{oc}$  – высота слоя суспензии и осадка, соответственно;

$V_c, V_{oc}$  – объемы суспензии и осадка, соответственно;

$\delta$  – плотность твердой фазы осадка;

$m_c, m_{oc}$  – порозность суспензии и осадка, соответственно.

Анализируя полученные зависимости процесса фильтрования осадка с энергетических позиций, авторы приходят к выводу о прямой пропорциональной зависимости энергосодержания суспензии от удельной скорости его нарастания, которая определяется как:

$$A = C_I / P^{0.6}, \quad (1.9)$$

где  $C_I$  – постоянный коэффициент,

$P$  – гранулометрический параметр [29, с. 45].

Гранулометрический параметр, от которого зависит скорость процесса, определяется по гранулометрическому составу твердой фазы осадка как отношение среднего диаметра частиц, составляющих скелет осадка, и среднего диаметра частиц заполнителя.

Следует отметить, что авторы используют фундаментальный подход с энергетических позиций к проблеме повышения эффективности механического обезвоживания. Однако, в данных работах не рассматриваются методы воздействия на осадок путем приложения сдвиговых полей и изменение энергетического состояния при этом.

В ранних работах по теории обезвоживания фильтрация рассматривается как процесс, который может быть описан линейным законом при определенном интервале чисел Рейнольдса [32, с. 54]:

$$w = \Delta P d^2 m^3 / (1-m)^2 144 h \mu. \quad (1.10)$$

Здесь  $w$  – скорость фильтрации;

$\Delta P$  – перепад давления;

$d$  – размер частиц;

$m$  – пористость;

$h$  – высота пористого слоя;

$\mu$  – вязкость жидкости.

В работе указывается, что фильтрование с отклонением от линейного закона фильтрации происходит при превышении числа Рейнольдса более критического. Такое фильтрование характерно для движения жидкости в крупнозернистых пористых средах при крупности частиц более 1мм. В диапазоне значений чисел Рейнольдса  $Re = 0.016-5.7$ , характерного для исследуемой крупности осадков, полностью сохраняется линейный закон фильтрации.

В цикле работ [33, 34, 35] опубликованы результаты исследования кинетики выделения фильтрата при фильтровании илосодержащих шламов и на этой базе сделаны выводы о возможности применения закона Дарси и обобщенного уравнения фильтрования для зернистых сред, имеющих различную проницаемость, в определенных пределах. Авторы установили значения начального градиента  $\lambda$  и его независимость от перепада давления. Для описания процесса фильтрования предложена экспоненциальная зависимость:

$$h(t) = h_m (1 - e^{-kt}), \quad (1.11)$$

где  $h_m$  – толщина осадка,

$k, t$  – параметры процесса фильтрования.

Принятая обобщенная модель учитывает инерционные и вязкостные потери при высокой скорости фильтрования в начальный период времени. При фильтровании труднофильтруемых осадков (при малых скоростях процесса) модель учитывает потери, вызванные начальным градиентом. В ходе преобразований параболического закона фильтрования с целью приведения его к форме, удобной для экспериментального анализа,

предложено уравнение, имеющее вид:

$$(\Delta P / h u) - (\lambda / u) = b + a + u . \quad (1.12)$$

Здесь  $u$  – мгновенная скорость фильтрования;

$b$  – параметр, пропорциональный вязкости жидкости;

$a$  – коэффициент, учитывающий инерционные потери.

В работе [35, с.536] определены параметры обобщенной модели процесса фильтрования, которые хорошо согласуются с данными экспериментов.

Следует отметить, что в перечисленных работах не содержится сведений об изменении параметров процесса при структурных изменениях тонкодисперсных осадков в условиях динамического воздействия на осадок.

В работах последних лет зарубежных авторов [36, 37, 38, 39] опубликованы результаты трехмерного моделирования порового пространства тонкодисперсных угольных осадков с помощью метода Латисса-Больцмана. Авторы показывают применимость этого метода для исследования течения жидкости при фильтрации в порах сложной конфигурации при крупности частиц менее 0,85мм (20 меш).

Публикации [38, с.489, 39, с.497, 40, 41, 42] посвящены исследованию фильтрации тонких угольных концентратов и отходов флотации с помощью фильтр-прессов. Указанные работы содержат технологические параметры регулирования результатов фильтрования при избыточном давлении. Определены зависимости влажности кека от времени и давления фильтрования, содержания твердого в питании, приведено изменение производительности пилотной установки для различных условий.

Автор работы [42, с.83] также уделяет внимание технологии обезвоживания с помощью фильтр-прессов, которые используются для фильтрования наиболее тонких и труднофильтруемых осадков, таких как угольные, глинистые и другие.

В работе [43] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по проверке линейного закона фильтрации

на зернистых пористых средах и уделено внимание анализу влияния структуры пористой среды на гидродинамику удаления жидкости.

Авторы публикаций [44, 45, 46, 47, 48] рассматривают электрохимические явления и методы предварительной электрохимической обработки шламового осадка для повышения скорости удаления влаги из осадка при фильтрации. Приведены результаты экспериментальных исследований и зависимости влажности осадка от соотношения угля и воды в питании. Показано, что при увеличении массового количества твердого в пульпе скорость фильтрации снижается при одновременном повышении влажности осадка. Авторы приходят к выводу о сложной зависимости этих параметров от времени электролиза, т.к. на экспериментальных кривых чередуются максимальные и минимальные значения и имеются два пика.

Результаты исследований, приведенные в работах [49, 50, 51, 52, 53, 54,], посвящены обезвоживанию тонких осадков в центробежном поле с применением нового типа оборудования – гипербарических центрифуг, в которых в добавление к центробежной фильтрации применяется продувка осадка сжатым воздухом. Такое воздействие способствует значительному снижению влажности тонких угольных осадков даже при высоком содержании шламов с крупностью менее 44 мкм.

Авторы приходят к выводу, что увеличение содержания класса менее 25 мкм в питании до 46% и выше не позволяет получить осадок с влажностью менее 20%.

Следует обратить внимание на то, что результаты исследований, представленные в этих источниках, получены при изучении процесса фильтрования на макроуровне, что недостаточно для полного анализа процессов, происходящих в поровой среде осадков.

В публикации [55] указывается на необходимость исследования интенсивности сжимаемости концентратных угольных осадков для повышения эффективности обезвоживания их фильтрованием. Автор из рассмотрения уравнений для давления, развиваемого жидкостью в

центробежном поле, и Сперри-Кармана для скорости фильтрации получает зависимость кинетики фильтрования жидкости в роторе при постоянном сопротивлении:

$$\ln \frac{V_n (2r_p S - V)}{V (2r_p S - V_n)} = \frac{r_p \rho_{ж} n^2 t}{90 \mu R}. \quad (1.13)$$

Здесь  $V_n$  – начальный объем продукта в роторе;

$r_p$  – радиус ротора;

$S$  – поверхность фильтрования в роторе;

$V$  – объем продукта, находящегося в роторе в момент времени  $t$ ;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкой фазы;

$n^2$  – число оборотов фильтрующего ротора;

$\mu$  – вязкость жидкой фазы;

$R$  – сопротивление осадка, равное произведению удельного сопротивления осадка на его толщину.

## 1.2 Исследование гидродинамических характеристик осадков углеобогащения

Многие исследователи [1, с.22, 2, с.44, 28, с.505, 32, с.34] рассматривают процесс фильтрования как гидродинамический, определяющее значение в котором имеет сопротивление осадка перемещению жидкой и газообразной фаз при прочих равных условиях. При этом принято, что удельное сопротивление осадка обратно пропорционально его проницаемости.

Для определения проницаемости осадка обычно используют известное уравнение Дарси [32, с.42]:

$$w = K_w j, \quad (1.14)$$

где  $K_w$  – коэффициент фильтрации, представляющий собой удельную скорость фильтрации воды,

$$K_w = V / S \tau;$$

$j$  – гидравлический градиент.

$V$  – объем воды, протекающей через слой осадка сечением  $S$  за время  $\tau$ .

Гидравлический градиент связан со следующими параметрами:

$$j = \Delta P / \gamma h, \quad (1.15)$$

где  $\Delta P$  – градиент давления;

$\gamma$  – удельный вес воды;

$h$  – толщина слоя осадка.

Отсюда для коэффициента фильтрации можно записать:

$$K_w = w \gamma h / \Delta P = w \delta g h / \Delta H \delta g = w h / \Delta H. \quad (1.16)$$

Здесь  $\delta$  – плотность материала осадка;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\Delta H$  – потери напора при движении воды в порах осадка.

Известно, что скорость фильтрации можно представить в виде соотношения:

$$w = C \Delta P / \mu h. \quad (1.17)$$

Здесь  $C$  – проницаемость осадка;

$\mu$  – вязкость воды.

С учетом соотношений (1.16) и (1.17) получено:

$$C = K_w \mu / \delta g. \quad (1.18)$$

После этого выполнялись эксперименты по исследованию фильтруемости тех же проб осадков, для чего использована стандартная лабораторная установка, включающая конвективный узел, схема которой представлена на рисунке 1.1.

Первой фазой фильтрования был набор осадка на фильтровальную сетку в течение 50с, второй фазой являлась просушка осадка при том же значении времени, для чего фильтровальный элемент извлекался из объема суспензии и выдерживался на воздухе при продолжении действия разрежения. Перепад давления установлен равным 67 КПа. В течение всего цикла фильтрования ресивер заполнялся фильтратом, объем которого

регистрировался визуально по показаниям весов. Опыты дублировались и определялись средние значения показателей.

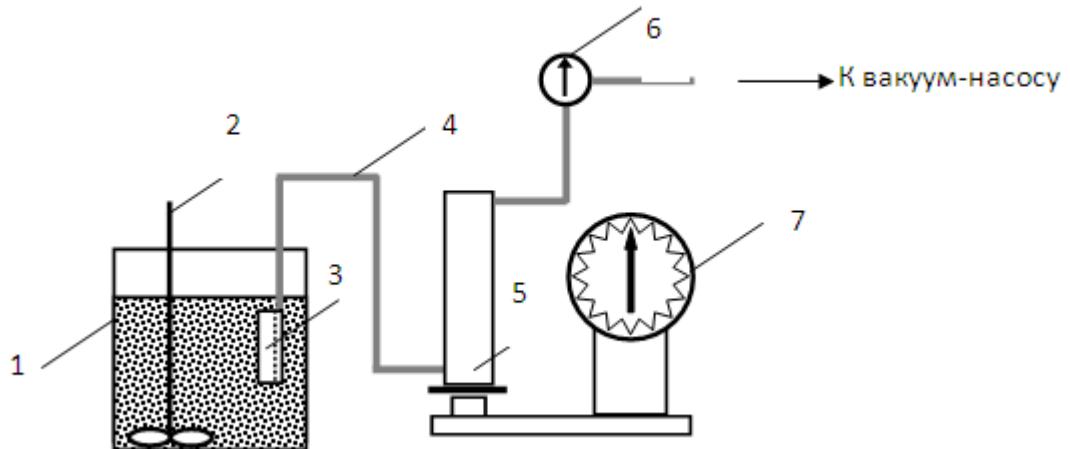


Рисунок 1.1 – Установка для исследования фильтруемости осадков:

1 – сосуд с суспензией, 2 – конвективный элемент (мешалка), 3 – фильтровальный элемент, 4 – соединительные шланги, 5 – ресивер для фильтрата, 6 – вакуумметр, 7 – весы

Фундаментальные исследования по фильтрации [56, 57, 58, 59, 60, 61] содержат сведения о классификации процессов фильтрования на следующие типы: фильтрование с образованием несжимаемого осадка, фильтрование с формированием сжимаемого осадка, фильтрование с полным или частичным закупориванием пор фильтрующей перегородки, а также фильтрование с закупориванием пор промежуточного вида. В разных случаях вид экспериментально полученной зависимости в координатах  $V, \tau/V$  отличается.

### 1.3 Имитационное моделирование структуры осадков при механическом воздействии

В соответствии с разработанной методикой [32, с.52] частицы в осадке представляются в виде сферических элементов, которые взаимодействуют друг с другом. В основу численного моделирования положены базовые

разработки, опубликованные в работах [62, 63, 64]. Основной элемент модели – взаимодействие двух дискретных частиц – показан на рисунке 1.2.

Для построения математической модели использованы второй и третий законы Ньютона и закон Гука. Достоверность результатов моделирования обеспечивается соблюдением динамического, кинетического и геометрического подобия [65, 66, 67, 68, 69].

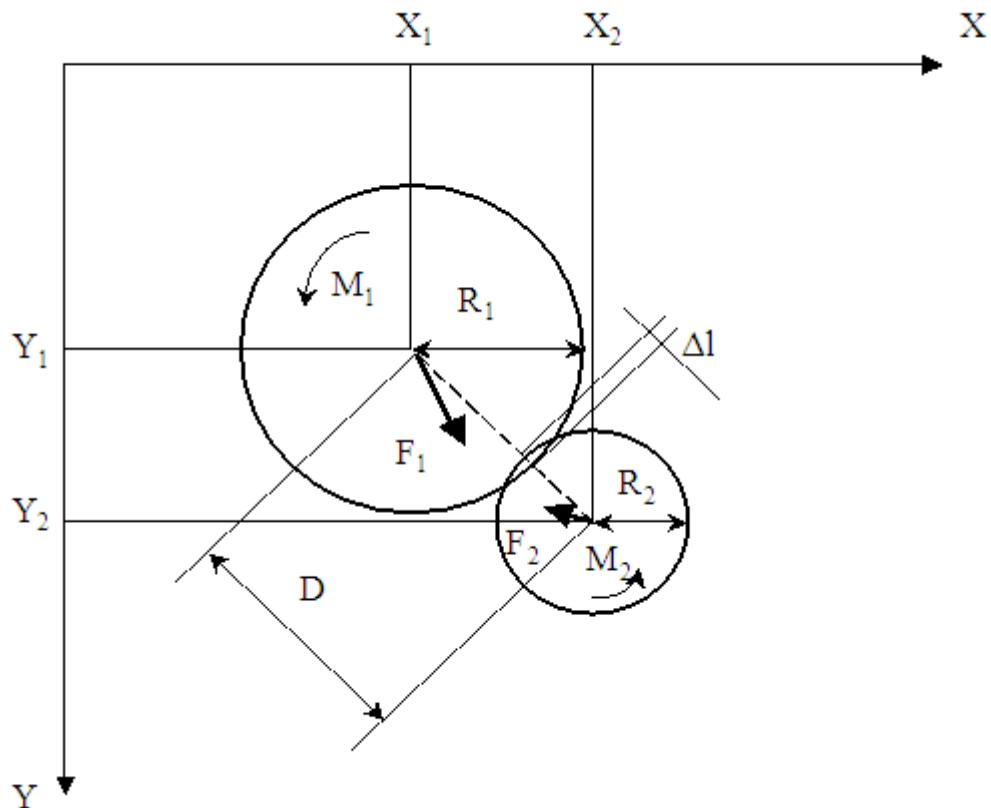


Рисунок 1.2 – Базовая схема взаимодействия двух элементов

Для выполнения динамического подобия используется масштаб, соответствующий подобию сил, скоростей и ускорений, имеющих место в натуре и в модели. Подобие траекторий движения обеспечивает кинетическое подобие, что достигается постоянным соотношением между скоростями и ускорениями взаимодействующих элементов в модели и натуре. Кроме того, поддерживается масштаб по времени при выполнении итераций и начальное состояние системы и направление протекания

процессов в модели соответствуют таким же в натуре.

Для выполнения условия геометрического подобия принятые определенные соотношения для размеров частиц натуры и модели.

В ходе взаимодействия элементов учитываются свойства каждого элемента: размеры в определенном масштабе и плотность вещества. Это дает возможность исследовать взаимодействие и движение различных фаз. Фазы могут перемещаться независимо одна от другой или взаимодействовать при касании или прижатии.

Для задания размеров элементов вводятся значения их радиусов  $R_1$  и  $R_2$  в определенном масштабе. В исходном файле задаются следующие параметры: начальная скорость элемента в горизонтальном и вертикальном направлении (вдоль осей  $X$  и  $Y$ ), начальная скорость вращения, соответствующие этим скоростям приращения (ускорения). Кроме того, вводится целый ряд коэффициентов, которые отражают свойства среды и элементов: коэффициенты трения качения и скольжения, вязкостного сопротивления (внешнего для среды и внутреннего), сопротивления кручению (внешнего и внутреннего), касательной и нормальной жесткости, жесткости на изгиб. Исследователь вводит определенные параметры, позволяющие установить режим контакта элементов, режим адгезии и расстояние, на котором адгезионное взаимодействие способствует образованию комплексов элементов. Каждому элементу в программе присваивается порядковый номер, который облегчает затем обработку полученных в результате итераций и расчетов данных о перемещении центра тяжести элемента и углах поворота его радиуса.

Заданные начальные условия приводят с течением времени к возникновению сил  $F_1$  и  $F_2$ , вызывающих перемещение частиц в пространстве, их столкновение и взаимодействие в прямоугольной системе координат  $X$ - $Y$ . Столкновение частиц приводит в соответствии с законом Ньютона к проявлению действия моментов  $M_1$  и  $M_2$  и к вращению элементов.

Особенностью модели является нехарактерное расположение оси

ординат  $Y$ . Это связано с тем, что первоначально модель была разработана для исследования перемещения массивов пород в горном деле при ведении добывающих подземных работ [70, 71].

В соответствии с законом всемирного тяготения каждому элементу присущее постоянно действующее в вертикальном направлении ускорение силы тяжести  $g$  – ускорение свободного падения. При столкновениях элементов возникает момент движения, который приводит к увеличению скорости или ее уменьшению, что приводит к торможению частиц.

На каждый из элементов действуют соответствующие силы: сила тяжести; сила Архимеда; сопротивление среды, в которой происходит движение; силы, возникающие при взаимодействии элементов [72, 73, 74, 75].

В ходе имитационного моделирования циклически выполняется перебор параметров всех элементов в последовательности увеличения их порядкового номера, присвоенного в файле исходных данных. При выполнении одной итерации, длительность которой по отношению к реальному времени также задается в исходном файле и соответствует одному циклу работы программы, параметры перемещения элементов – силы, скорости и ускорения – остаются постоянными. В следующий момент времени при переходе от итерации к итерации эти параметры пересчитываются в программе и соответственно на этой базе определяются координаты центра тяжести ( $X$  и  $Y$ ) для каждого элемента. Изменение этих координат и последующее изменение положения центра тяжести элемента происходит в дискретные периоды времени (циклы счета) [76, 77, 78, 79, 80].

Изменение скорости в горизонтальном направлении вдоль оси  $X$  зависит от массы взаимодействующих элементов и величины возникающей при этом силы. Изменение вертикальной составляющей скорости каждого элемента  $\Delta V_Y$  на определенном цикле работы рассчитывается по известной зависимости:

$$\Delta V_Y = g \Delta t, \quad (1.19)$$

где  $\Delta t$  – приращение времени за один цикл расчета, с.

После вычисления изменения скоростей элементов в программе производится расчет новых координат центров тяжести для каждого элемента и перемещение на новую позицию по соотношениям:

$$X_{i+1} = X_i + \Delta V_X \Delta t, \quad (1.20)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + \Delta V_Y \Delta t, \quad (1.21)$$

где  $X_i, Y_i$  – координаты центра тяжести элемента на предыдущем цикле счета,

$X_{i+1}, Y_{i+1}$  – координаты центра тяжести элемента на последующем цикле счета (новые)

$\Delta V_X$  – приращение скорости элемента в направлении оси  $X$ ,

$\Delta V_Y$  – приращение скорости элемента в направлении оси  $Y$ .

После этого программой выполняется проверка наличия взаимодействия элементов. Для этого производится определение расстояния  $D$  между их центрами тяжести и возможного перекрытия границ элементов при взаимодействии  $\Delta l$ . При наличии такого перекрытия границ элементов (нахлестки) рассчитываются значения действующих на элементы сил в вертикальном и горизонтальном направлениях по соотношению:

$$\Delta F = K \Delta l. \quad (1.22)$$

Здесь  $\Delta F$  – приращение действующей на каждый элемент силы,

$K$  – коэффициент жесткости элемента,

$\Delta l$  – перекрытие поверхности элементов при взаимодействии.

После вычисления сил определяются их моменты, в результате действия которых возникает поворот элементов на определенный угол. Далее элементы перемещаются на новые позиции в соответствии с полученными действующими на них силами. Все операции расчета циклически повторяются.

## 1.4 Результаты анализа теории и технологии процессов. Цель и задачи исследования

Технология производства многих материалов промышленного назначения включает как базовый этап процесс конвективной обработки многокомпонентных смесей, что особенно характерно для процессов обогащения углей, производства ряда химических материалов, предпродажной обработки непосредственно в условиях предприятий-производителей. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности, что приводит к повышенному расходу энергии и топлива, как собственного, так и привозного, в том числе импортируемых нефтепродуктов и газа.

В этой связи актуальной является задача модернизации технологических схем и оптимизации параметров процессов

Одним из основных сдерживающих факторов при внедрении современных технологических решений является несовершенство имеющегося в настоящее время математического аппарата для исследования процессов и расчета параметров технологических схем, в связи с чем возникает задача разработки новых методов теоретических и экспериментальных исследований.

Наиболее эффективным современным средством решения данной задачи является метод математического моделирования с применением детерминированных математических моделей.

Важнейшим этапом разработки технологических систем является построение математической модели объекта или процесса [81]. На базе математической модели объекта формируются критерии качества и ограничения, выбираются структура и параметры проекта системы, технические средства реализации. Для технологических процессов обработки материалов могут быть построены различные по полноте и сложности

описания математические модели. Основным фактором, определяющим полноту и точность математической модели, является цель моделирования.

Существует два основных метода построения математических моделей:

1) разработка модели на базе физических законов протекания процессов, в частности, законов механики сплошной среды, аэродинамики, тепломассопереноса;

2) экспериментально-статистические методы построения модели.

Экспериментально-статистические методы сводятся к построению весовой (импульсной переходной) функции объекта, которая полностью определяет его статистические и динамические свойства. На базе экспериментальных данных, полученных в процессе нормального функционирования объекта, определяются весовые функции различных одномерных каналов типа «вход-выход» и т.д.

На современном этапе в связи с развитием компьютерных технологий все шире применяется метод имитационного моделирования, в определенной степени объединяющий преимущества физического и математического моделирования.

Для математического моделирования строго ранжированных технологических процессов обработки материалов более удобным в инженерном отношении и универсальным является первый метод построения, базирующийся на физических законах: излучение (законы Планка, Стефана-Больцмана, Ламберта и др.), фильтрация (закон Дарси), конвекция (закон Ньютона-Рихмана), теплопроводность (закон Фурье) и др.

В результате проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы, представленные во введении.

**Целью работы** является совершенствование математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств для исследования процессов и обоснования параметров технологических систем, содержащих узлы конвективного типа.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- выполнить анализ технологических схем и процессов функционирования оборудования, осуществляющего перемешивание многокомпонентных смесей с целью определения особенностей протекания процессов и определения параметров, влияющих на качество конечной продукции;
- разработать математические модели и провести компьютерные исследования процессов в условиях вариации технологических параметров;
- проанализировать математические модели и провести моделирование процессов в условиях применения конструктивных модификаций оборудования;
- систематизировать результаты моделирования технологии и разработать алгоритмы обоснования параметров процессов, обеспечивающих повышение эффективности работы оборудования;
- разработать рекомендации по модернизации параметров технологических процессов и оборудования;
- разработать методы инженерного расчёта параметров процесса для обеспечения оперативной оценки их значений при проектировании;
- разработать структуру системы автоматизированного проектирования оборудования и технологии процессов конвективной обработки многокомпонентных материалов;
- разработать рекомендации для практического применения результатов работы в области производства многокомпонентных материалов методом конвективного воздействия.

## 1.5 Выводы по разделу 1.

1. Технология производства многих материалов промышленного назначения включает как базовый этап процесс конвективной обработки многокомпонентных смесей. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности.

В этой связи актуальной является задача модернизации технологических схем и оптимизации параметров процессов

2. Одним из основных сдерживающих факторов при внедрении современных технологических решений является несовершенство имеющегося в настоящее время математического аппарата для исследования процессов и расчета параметров технологических схем, в связи с чем возникает задача разработки новых методов теоретических и экспериментальных исследований.

3. Наиболее эффективным современным средством решения данной задачи является метод математического моделирования с применением детерминированных математических моделей.

4. Обоснованы цель и задачи исследования.

## РАЗДЕЛ 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПАРАМЕТРОВ АППАРАТА С ОДНОЛОПАСТНЫМ КОНВЕКТИВНЫМ  
ЭЛЕМЕНТОМ

Основу содержания раздела составляют исследования автора, посвящённые решению задач математического моделирования машин, технологический процесс функционирования которых предполагает конвективное воздействие на многокомпонентные смеси, являющиеся сырьём для производства специальных материалов.

Изложенные ниже в разделе 2 результаты получены автором при выполнении работ [82]. В обобщённом варианте результаты представлены в монографии [83], где автору принадлежит материал «Часть I, Раздел 5, с. 128 – 151».

Как правило, сложное технологическое оборудование, реализующее процессы конвективного перемешивания многокомпонентных смесей, включает ряд узлов, предназначенных для воздействия на исходные материалы, конечной целью процесса является гомогенная масса, равномерно распределённая в рабочем объёме.

При проектировании используемых к настоящему времени аппаратов такого типа применяются традиционные методы, включающие вывод эмпирических зависимостей для расчёта параметров с последующими многочисленными лабораторными экспериментами и опытно-промышленными испытаниями.

К сожалению, подобные методы уже исчерпали свои возможности, и применяемые аппараты не позволяют стабильно получать гомогенные смеси с хорошо воспроизводимыми свойствами без их реконструкции, т.к. в рабочем объёме машины не достигается необходимая степень однородности компонентов в осадке, происходит залегание твердой фазы на днище, наблюдается налипание осадков на стенках. Реконструкция аппарата требует

соответствующего обоснования, что вызывает необходимость теоретических и экспериментальных исследований [84,85].

Наиболее эффективным методом решения рассматриваемых задач является метод математического моделирования, позволяющий получить с помощью компьютера достаточно широкий набор данных о реконструируемом объекте без проведения долговременных и дорогостоящих натурных исследований [86, 87, 88, 89, 90].

Построение адекватной математической модели объекта или процесса является важнейшим этапом разработки сложных современных технологических систем. На базе математической модели объектарабатываются критерии качества и ограничения, выбираются структура и параметры проекта системы, технические средства реализации. Для технологических процессов принудительной обработки материалов могут быть построены различные по полноте и сложности описания математические модели. Основным фактором, определяющим полноту и точность математической модели, является цель моделирования.

Для математического моделирования сложных технологических процессов наиболее удобным в инженерном отношении и универсальным является метод построения математических моделей, базирующийся на физических законах (тепломассоперенос, гидродинамика, конвекция и т.д.).

Следуя изложенным принципам, получаем детерминированную математическую модель, основанную на физических законах и адекватно отражающую характер и параметры процесса.

Рассматривая технологическое оборудование, реализующее процесс конвективного воздействия на многокомпонентные смеси, очевидно, следует начать с базовой модели аппарата, содержащего один моно лопастный конвективный элемент.

2.1 Физико-техническая постановка задачи математического моделирования процесса функционирования однолопастного конвективного аппарата

Последовательность формирования модели включают ряд промежуточных этапов.

1. Построение формализованной технической модели, где включены определяющие геометрические и гидродинамические характеристики процесса.

2. Формирование на базе принятой технической модели соответствующей математической модели, включающей набор физических показателей процесса.

3. Выбор численных методов, разработка программной модели и исследование процесса на основе компьютерных технологий.

Обобщённая техническая схема аппарата приведена на рисунке 2.1, в таблице 2.1 показана примерная форма представления некоторых характеристик компонентов.

Таблица 2.1 – Примерный перечень характеристик

Исходные растворы, г/л					Состав смеси, г/л					Содержание твёрдой фазы в супензии, г/л				

Результатом компьютерного моделирования является исследование параметров, обеспечивающих, во 1-х, стабильный непрерывный гидродинамический режим, близкий к режиму идеального перемешивания, во 2-х, образование конгломерата с постоянными физическими свойствами, и в 3-х, образование конечного продукта (твердой составляющей смеси) с требуемыми свойствами.

## 2.2 Принцип построения математической модели

В однолопастном конвективном аппарате математическая модель процесса перемешивания многокомпонентной смеси строится на базе уравнений, отражающих физический процесс конвекции массы, которая происходит за счет перемешивания смеси лопастью, угловая скорость вращения которой  $\omega$ .

Для формирования уравнений, положенных в основу математической модели, строится формализованная геометрическая модель.

Область существования решения представляет собой внутреннее пространство  $G$  рассматриваемого аппарата (Рисунок 2.1), и в этой области требуется определить концентрацию твердой фазы, учитывая при этом вихревые течения раствора, продольную и поперечную диффузию, форму внутреннего пространства и угловую скорость вращения лопасти.

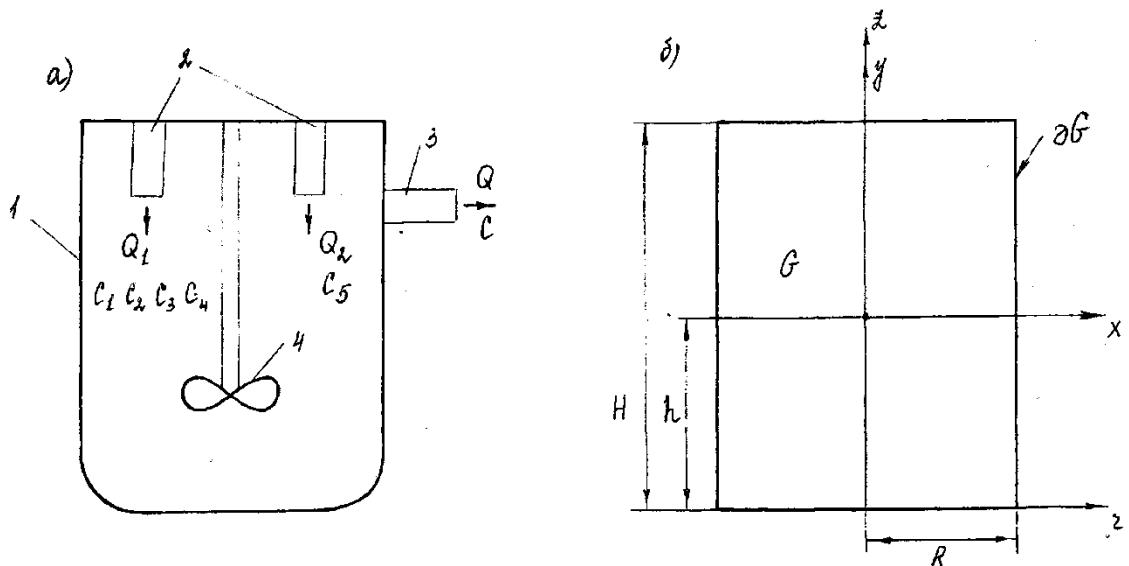


Рисунок 2.1 – Схема построения математической модели аппарата:

- 1 – корпус, 2 – входные трубопроводы, 3 – верхний перелив (выходной трубопровод), 4 – мешалка.
- б) к выбору координат и построению математических моделей.

## 2.3 Математическое моделирование процесса

Принципиальным моментом при построении математической модели является то, что она должна быть сформирована на базе системы уравнений в частных производных, которая приводит к постановке краевой задачи с четырьмя неизвестными функциями: концентрация твердой компоненты, концентрация жидкой фазы, функция тока и поверхность кристаллизации. В конечном счёте необходимо установить условия и параметры, при которых обеспечивается равномерное распределение твёрдой фазы, следовательно, концентрацию жидкой фазы можно считать постоянной, хотя и неизвестной величиной (определяется автоматически в процессе моделирования).

Рассматриваемые задачи являются нелинейными и не имеют аналитических решений, что предопределяет применение численных методов.

Кроме того, предпринятые ранее попытки решения подобных задач основывались на том, что поле скоростей частиц раствора в аппарате известно, однако физически такие данные получить невозможно, вследствие чего приходится использовать те или иные способы приближений, что снижает качество получаемых решений. В данной же работе предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать поле скоростей частиц перемешиваемой массы в процессе решения краевой задачи, в этом состоит существенное отличие предлагаемой модели от рассмотренных ранее.

### 2.3.1 Разработка математических моделей

Поскольку математическое моделирование процесса с применением детерминированных моделей осуществляется впервые, математические модели (а соответственно и краевые задачи) строятся от базовых соотношений с минимальным числом параметров до многомерных уравнений и систем.

Очевидно, наиболее представительной будет модель, содержащая три параметра (2 пространственных и время), что соответствует обозначенной выше области решения (Рисунок 2.1).

### 2.3.2 Построение математических моделей и формирование краевых задач

#### a) Модель **(0-D)**.

Базовой моделью **(0-D)** является модель идеального перемешивания. Концентрация твердой фазы рассматривается как функция времени:  $C=C(t)$ .

Тогда  $C(t)$  является решением следующей задачи Коши:

$$\frac{V}{T} \cdot \frac{dC}{dt} = Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5 - Q \cdot C \quad (2.1)$$

$$C(0) = C_0, Q = Q_1 + Q_2 \quad (2.2)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – концентрации компонент, поступающих в виде раствора, причем первые четыре поступают с расходом  $Q_1$  л/мин, а последняя компонента с расходом  $Q_2$  л/мин;  $V$  – объем реактора,  $T$  – время перемешивания,  $C_0$  – начальная концентрация.

Задача (2.1), (2.2) описывает модель идеального перемешивания. Решение этой задачи имеет вид:

$$C(t) = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{T \cdot Q}{V} \cdot t\right) + \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5}{Q} \left[1 - \exp\left(-\frac{T \cdot Q}{V} \cdot t\right)\right] \quad (2.3)$$

Вектор скорости частицы записывается в виде  $\vec{V} = V_x \cdot \vec{i} + V_y \cdot \vec{j}$  (плоский случай), где  $V_x$  и  $V_y$  соответственно абсцисса и ордината вектора  $\vec{V}$ , и удовлетворяет уравнениям:

$$\text{rot} \vec{V} = \mu(x, y), (x, y) \in G = (0 < x < 1, 0 < y < 1) \quad (2.4)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0, (x, y) \in \partial G \quad (2.5)$$

граничное условие:

$$\vec{V}_n = 0, (x, y) \in \partial G \quad (2.6)$$

Краевая задача (2.4) – (2.6) определяет поле скоростей частиц в рассматриваемом аппарате.

В качестве функции воздействия удобно принять функцию:

$$\mu(x, y) = \frac{\omega}{\nu(l^2 x^2 + h^2 y^2)}, \quad x \neq 0, y \neq 0, \mu(0,0) = \omega \quad (2.7)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения лопасти,  $\nu$  – коэффициент вязкости раствора,  $h$  – характерный поперечный размер аппарата,  $l$  – продольный размер.

Введя функцию тока  $\psi(x, y)$ , запишем задачу (2.4) – (2.6) в другом виде:

$$\frac{1}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{1}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \mu(x, y), \quad (x, y) \in G \quad (2.8)$$

$$\psi(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \partial G \quad (2.9)$$

При этом вектор скорости  $\vec{V}$  и функция тока  $\psi(x, y)$  связаны следующими равенствами:

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (2.10)$$

б) Модель (1-Д).

Концентрация  $C(t, x)$  является решением следующей краевой задачи:

$$\frac{1}{T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = -V_x \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D_L}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5 - QC}{V}$$

$$0 < x < 1, \quad t > 0 \quad (2.11)$$

$$C_x(t, 0) = C_x(t, 1) = 0 \quad (2.12)$$

$$C(0, x) = C_0 \quad (2.13)$$

Краевая задача (2.11) – (2.13) является одномерной моделью однолопастного аппарата.

в) Модель (2-Д).

При двух геометрических переменных  $x$  и  $y$  концентрация  $C(t, x, y)$  является решением уравнения:

$$\frac{1}{T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = -V_x \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D_L}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + V_y \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{D_H}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5 - QC}{V}$$

$$(x, y) \in G, \quad t > 0 \quad (2.14)$$

при следующем граничном и начальном условии:

$$C_x(t, x, y) = 0, \quad (t, x, y) \in \partial G \times [0, 1] \quad (2.15)$$

$$C(0, x, y) = C_0 \quad (2.16)$$

Краевая задача (2.11)–(2.16) описывает двумерный вариант модели аппарата, она содержит две неизвестные функции  $\psi(x, y)$  и  $C(t, x, y)$ .

2) Модель (2-D cyl).

В этом случае геометрическими переменными являются радиус  $r$  и высота  $z$ . Тогда:

$$\text{rot} \vec{V} \Big|_{\varphi} = \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial r}$$

где  $\vec{V} = V_r \cdot \vec{i} + V_z \cdot \vec{k}$ ,  $V_{\varphi} = 0$ ,  $\varphi$  – угол.

$$\frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial r} = \mu(r, z)$$

$$\frac{\partial(r \cdot V_r)}{\partial r} + \frac{\partial(r \cdot V_z)}{\partial z} = 0$$

Тогда

$$V_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad V_z = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r}$$

$$\frac{1}{H^2} \cdot \frac{\partial \psi^2}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{R^2 \cdot r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{r \cdot \omega \cdot R}{R^2 r^2 + H^2 \cdot z^2};$$

$$D = (0 < r < 1, 0 < z < 1) \quad (2.17)$$

$$\psi(r, z) = 0; \quad (r, z) \in \partial D \quad (2.18)$$

( $H$  и  $R$  – характерные размеры реактора).

Поле скоростей частиц в рабочем пространстве аппарата определено из решения краевой задачи (2.17), (2.18), концентрация твердой фазы  $C(t, r, z)$  находится из решения следующей задачи:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{1}{r \cdot R \cdot H} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{1}{r \cdot R \cdot H} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + D_H \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \\
& + \frac{D_R}{r \cdot R} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5 - Q C}{V} \\
0 < r < 1, \quad 0 < z < 1
\end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0, \quad (t, r, z) \in \partial D \times [0, T] \tag{2.20}$$

$$C(0, r, z) = C_0 \tag{2.21}$$

### 2.3.3 Численное решение краевых задач с использованием метода конечных разностей

Для решения нелинейных уравнений математической физики, на которых основаны математические модели процессов работы однолопастного конвективного аппарата, необходимо применять численные методы [91].

Уравнение (2.11) в разностном виде:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{T} \cdot \frac{C_{ij} - C_{i,j-1}}{\tau} = & -V_x \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{C_{i+1,j} - C_{i-1,j}}{2h} + D_L \cdot \frac{1}{l^2} \cdot \frac{C_{i+1,j} - 2C_{ij} + C_{i-1,j}}{h^2} + f - \frac{Q}{V} \cdot C_{ij}; \\
f = & \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5}{V}.
\end{aligned}$$

Краевая задача (2.11) – (2.13) сводится к системе

$$C_{ij} = A \cdot C_{i-1,j-1} + B \cdot C_{i,j-1} + D \cdot C_{i+1,j-1} + F; \tag{2.22}$$

где

$$\begin{aligned}
A = & \left( \frac{V_x}{2 \cdot l \cdot h} + \frac{D_L}{l^2 h^2} \right) \cdot T \cdot \tau; \quad B = \left( 1 - \frac{2 \cdot D_L \cdot T \cdot \tau}{l^2 h^2} - \frac{Q \cdot T \cdot \tau}{V} \right) \\
D = & \left( \frac{D_L}{l^2 h^2} - \frac{V_x}{2 \cdot l \cdot h} \right) \cdot T \cdot \tau; \quad F = \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5}{V} \cdot T \cdot \tau.
\end{aligned}$$

Блок-схема и описание программы приводятся в п.п. 2.4.1 и (2.4.2).

Численная реализация двумерных моделей (2.8) – (2.10), (2.14) – (2.16):

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \cdot \frac{C_{ij}^{k+0,5} - C_{ij}^k}{0,5H_T} = & -\frac{V_x}{l} \cdot \frac{C_{i+1,j}^{k+0,5} - C_{ij}^{k+0,5}}{h \cdot H_x} - \frac{V_y}{h} \cdot \frac{C_{i,j+1}^k - C_{ij}^k}{H_y} + \frac{D_L}{l^2} \cdot \frac{C_{i+1,j}^{k+0,5} - 2C_{ij}^{k+0,5} + C_{i-1,j}^{k+0,5}}{H_x^2} + \\ & + \frac{D_H}{h^2} \cdot \frac{C_{i,j+1}^k - 2C_{ij}^k + C_{i,j-1}^k}{H_y^2} + f. \end{aligned}$$

Шаг ( $k+0,5$ ):

$$\begin{aligned} \frac{D_L}{l^2 \cdot H_x^2} \cdot C_{i-1,j}^{k+0,5} - \left( \frac{1}{0,5 \cdot T \cdot H_T} - \frac{V_x}{l \cdot H_x} + \frac{2 \cdot D_L}{l^2 \cdot H_x^2} \right) \cdot C_{ij}^{k+0,5} + \left( \frac{D_L}{l^2 \cdot H_x^2} - \frac{V_x}{l \cdot H_x} \right) \cdot C_{i+1,j}^{k+0,5} = \\ \left( \frac{V_y}{h \cdot H_y} - \frac{D_H}{h^2 \cdot H_y^2} \right) \cdot C_{i,j+1}^k + \left( \frac{2 \cdot D_H}{h^2 \cdot H_y^2} - \frac{1}{0,5 \cdot T \cdot H_T} - \frac{V_y}{h \cdot H_y} \right) \cdot C_{ij}^k - \frac{D_H}{h^2 \cdot H_y^2} \cdot C_{i,j-1}^k - f. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Шаг ( $k+1$ ):

$$\begin{aligned} \frac{D_H}{h^2 \cdot H_y^2} \cdot C_{i,j-1}^{k+1} - \left( \frac{1}{0,5 \cdot T \cdot H_T} - \frac{V_y}{h \cdot H_y} + \frac{2 \cdot D_H}{h^2 \cdot H_y^2} \right) \cdot C_{ij}^{k+1} + \left( \frac{D_H}{h^2 \cdot H_y^2} - \frac{V_y}{h \cdot H_y} \right) \cdot C_{i,j+1}^{k+1} = \\ \left( \frac{V_x}{l \cdot H_x} - \frac{D_L}{l^2 \cdot H_x^2} \right) \cdot C_{i+1,j}^{k+0,5} + \left( \frac{2 \cdot D_L}{l^2 \cdot H_x^2} - \frac{1}{0,5 \cdot T \cdot H_T} - \frac{V_x}{l \cdot H_x} \right) \cdot C_{ij}^{k+0,5} + \frac{D_L}{l^2 \cdot H_x^2} \cdot C_{i-1,j}^{k+0,5} + f. \end{aligned}$$

Краевая задача (2.8) - (2.10):

$$\begin{aligned} \psi(x_i, y_j) = \psi_{ij}; \quad i = 0, 1, \dots, N; \quad j = 0, 1, \dots, M; \\ \psi_{0j} = \psi_{Nj} = 0; \quad \psi_{i0} = \psi_{iM} = 0. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Разностная форма уравнения (2.8):

$$\begin{aligned} \psi_{ij} = \frac{1}{4} (\psi_{i-1,j} + \psi_{i+1,j} + \psi_{i,j-1} + \psi_{i,j+1}) \\ i = 0, 1, \dots, N; \quad j = 0, 1, \dots, M. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Блок–схема, описание программы и сама программа приводятся ниже.

Метод конечных разностей для задачи (2.17) - (2.21):

$$\begin{aligned} C_{i+1,j} = C_{ij} \left( 1 - \frac{T \cdot H_T \cdot Q}{V} - \frac{2D_R \cdot T \cdot H_T}{R^2 \cdot H_R^2} \right) + C_{i,j+1} \left( \frac{D_R \cdot T \cdot H_T}{2 \cdot r \cdot R \cdot H_R} + \frac{D_R \cdot T \cdot H_T}{R^2 \cdot H_R^2} - \frac{V_R \cdot T \cdot H_T}{2 \cdot R \cdot H_R} \right) + \\ + C_{i,j-1} \left( \frac{V_R \cdot T \cdot H_T}{2 \cdot R \cdot H_R} - \frac{D_R \cdot T \cdot H_T}{2 \cdot r \cdot R^2 \cdot H_R} + \frac{D_R \cdot T \cdot H_T}{R^2 \cdot H_R^2} \right) + \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5}{V} \cdot T \cdot H_T \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$C_{i0} = C_{iN}; \quad C_{0j} = C_{0M} = C_0 \quad (2.28)$$

Система уравнений (2.27) и (2.28) позволяет численно решить краевую задачу (2.19) – (2.21).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{H^2} \cdot \frac{\psi_{j,k+1} - 2\psi_{jk} + \psi_{j,k-1}}{\Delta^2 z_k} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\psi_{j+1,k} - 2\psi_{jk} + \psi_{j-1,k}}{H_R^2} - \\ & - \frac{1}{R^2 \cdot r_j} \cdot \frac{\psi_{j+1,k} - \psi_{j-1,k}}{2 \cdot H_R} = \mu(r_j, z_k) \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\psi_{0k} = \psi_{Nk} = \psi_{j0} = \psi_{iM} = 0 \quad (2.30)$$

где  $\psi(r_j, z_k) = \psi_{jk}$ ;  $j = 0, 1, \dots, N$ ;  $k = 0, 1, \dots, P$ .

Блок схема и описание программы приводятся в п. 2.4.1, численные результаты в п. 2.4.2.

## 2.4 Программы моделирования и численные результаты.

Базовая компьютерная программа разработана для численного моделирования гидродинамических процессов при работе однолопастных машин конвективного типа.

Уравнение в безразмерных величинах имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{1}{l \cdot h} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{1}{l \cdot h} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\Delta_L}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\Delta_H}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + f_1 + f_2 + f_3 \\ 0 < x < 1, \quad 0 < y < 1, \quad 0 < t < 1 \end{aligned} \quad (2.31)$$

Начальное условие:

$$C(x, y, 0) = C_0 \quad (2.32)$$

Границные условия при отсутствии обмена с внешней средой:

$$\begin{aligned} C_x(0, y, t) &= C_x(1, y, t) = 0 \\ C_y(x, 0, t) &= C_y(x, 1, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

Функции  $f$  имеют вид:

$$f_1 = \begin{cases} 0 & x \neq x_1 \quad y \neq y_1 \\ \frac{Q_1 \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)}{V1} & x = x_1 \quad y = y_1 \end{cases} \quad (2.34)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0 & x \neq x_2 \quad y \neq y_2 \\ \frac{Q_2 \cdot C_5}{V1} & x = x_2 \quad y = y_2 \end{cases} \quad (2.35)$$

$$f_3 = \begin{cases} 0 & x \neq x_3 \quad y \neq y_3 \\ -\frac{Q \cdot C}{V1} & x = x_3 \quad y = y_3 \end{cases} \quad (2.36)$$

Функция тока  $\psi(x, y)$

$$\frac{1}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{1}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \mu(x, y),$$

$$0 < x < 1, \quad 0 < y < 1 \quad (2.37)$$

$$\mu(x, y) = \begin{cases} \frac{W}{V1} & x = x_0 \quad y = y_0 \\ \frac{W}{V1 \cdot FN \cdot (l^2(x - x_0)^2 + h^2 \cdot (y - y_0)^2)} & x \neq x_0 \quad y \neq y_0 \end{cases} \quad (2.38)$$

$$\psi(x, 0) = \psi(x, 1) = \psi(0, y) = \psi(1, y) = 0 \quad (2.39)$$

Переменные, указанные в уравнениях, имеют следующий смысл:

$x, y$  – координаты пространства, безразмерные величины;  $t$  – время, с;  $C$  – концентрация твердой фазы в рабочем объеме цилиндра, содержащего супензию, г/см<sup>3</sup>;  $l$  – максимальный размер по оси X (радиус цилиндра), см;  $H$  – максимальный размер по оси Y (высота цилиндра), см;  $Vl$  – площадь поперечного сечения цилиндра, см;  $D_L, D_h$  – коэффициенты продольной и поперечной диффузии, безразмерные величины;  $f_1, f_2$  – функции, отражающие точечные источники твердой фазы, если они есть, г/(с·см);  $f_3$  – функция, отражающая отток супензии, г/(с·см);  $C_0$  – начальное распределение концентрации твердой фазы, г/см<sup>3</sup>;  $(x_1, y_1)(x_2, y_2)$  – координаты точечных источников;  $(x_3, y_3)$  – координаты точечного оттока;  $Q_1, Q_2$  – интенсивность источников, см<sup>3</sup>/с;  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – характеристики источников (концентрация), г/см<sup>3</sup>;  $Q$  – интенсивность оттока ( $Q = Q_1 + Q_2$ ) см<sup>3</sup>/с;  $C$  – характеристика оттока, г/см;  $T$  – время исследования процесса, с;  $W$  – угловая скорость вращения лопасти, если в рабочем объеме устанавливается устойчиво конвективного перемешивания (при его отсутствии  $W=0$ ), об/с;  $x_0, y_0$  – координаты источника вращения;  $FN$  – вязкость супензии, безразмерная величина.

На рисунке 2.2 приведена блок-схема алгоритма.

Для исследования на ЭВМ гидродинамических параметров разработана программная модель [91, 92]

Назначение программы - численное решение задачи о распределении концентрации раствора в конвективном аппарате (2.31) - (2.36).

Результаты выводятся на печать в виде таблиц, снабженных комментариями, что упрощает их обработку. Концентрация твердой фазы печатается в виде таблицы  $20 \times 20$ , что соответствует сетке, представляющей сечение аппарата. По этим данным строятся кривые равного уровня, причем отрицательные значения опускаются (они соответствуют наличию «вихрей»).

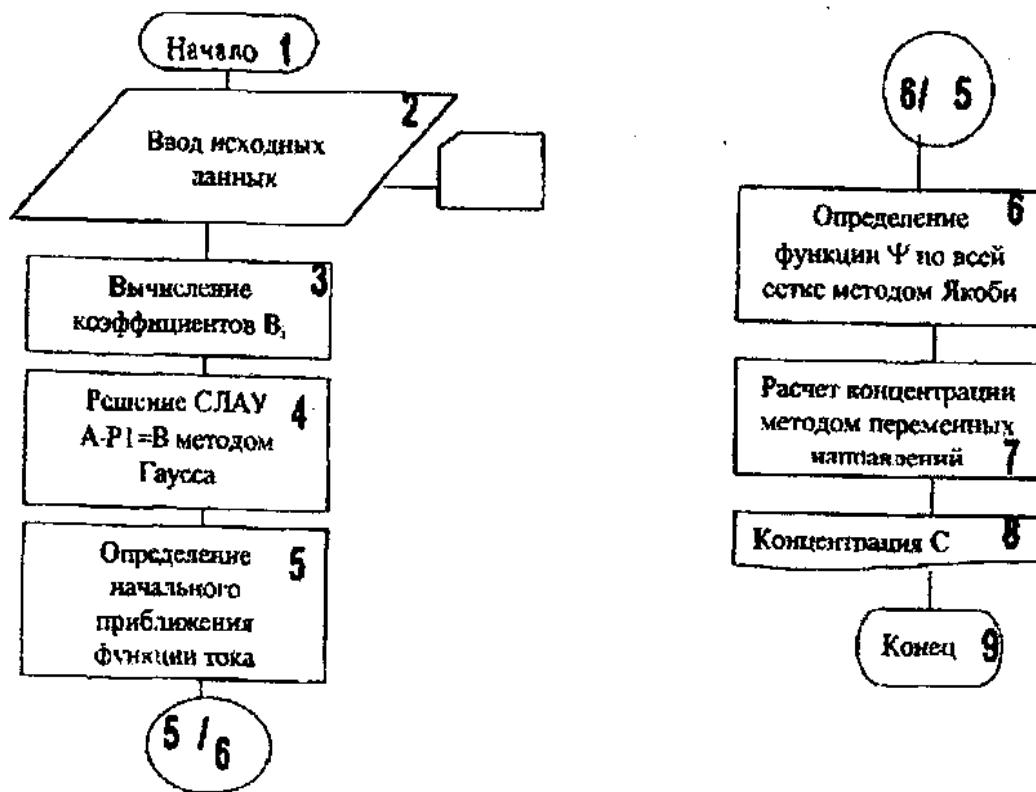


Рисунок 2.2 – Обобщённая блок-схема алгоритма численного решения задачи о распределении концентрации раствора в химическом реакторе

## 2.4.1 Описание программ

### 2.4.1.1 Модель (1-D)

$$\frac{1}{T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = -V_x \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D_L}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + f(x, t)$$

$$f(x, t) = \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5 - QC}{V}$$

$$C_x(0, t) = C_x(l, t) = 0$$

$$C(0, x) = C_0 = 40.$$

(Рисунок 2.3).

### 2.4.1.2 Модель (2-D), программа SILITE.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V_R \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{D_R}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + D_R \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5 - QC}{V}$$

$$C_r(0, t) = C_r(R, t) = 0$$

$$C(r, 0) = 40.$$

(Рисунок 2.4).

### 2.4.1.3 Модель(2-Dcyl)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V_z(r, z) \cdot \frac{\partial C}{\partial z} - V_r(r, z) \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + D_L \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + D_R \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} +$$

$$+ \frac{Q_1}{V} \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + \frac{Q_2}{V} \cdot C_5 - \frac{Q}{V} \cdot C$$

$$C(0, r, z) = 40.$$

$$C_z(t, r, 0) = C_z(t, r, 20) = 0$$

$$C_r(t, 0, z) = C_r(t, 10, z) = 0$$

$$V_z = -0,005; \quad V_r = 0,05; \quad D_L = D_R = 0,005; \quad Q_1 = 25;$$

$$Q_2 = 40; \quad C_1 = 185,3; \quad C_2 = 20,6; \quad C_3 = 57,3;$$

$$C_4 = 2,5; \quad C_5 = 210; \quad V = 6300; \quad Q = Q_1 + Q_2.$$

(Рисунок 2.6).

#### 2.4.1.4 Модель (2-Dxy)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + D_L \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_H \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} +$$

$$+ \frac{Q_1}{V} \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + \frac{Q_2}{V} \cdot C_5 - \frac{Q}{V} \cdot C;$$

$$-l < x < l;$$

$$-h < y < h;$$

$$0 < t < T;$$

$$C(0, x, y) = 40;$$

$$C_x(t, \pm l, 0) = 0;$$

$$C_y(t, x, \pm h) = 0.$$

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{i} + V_y \cdot \vec{j}.$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y'^2} = \frac{\omega}{x'^2 + y'^2}$$

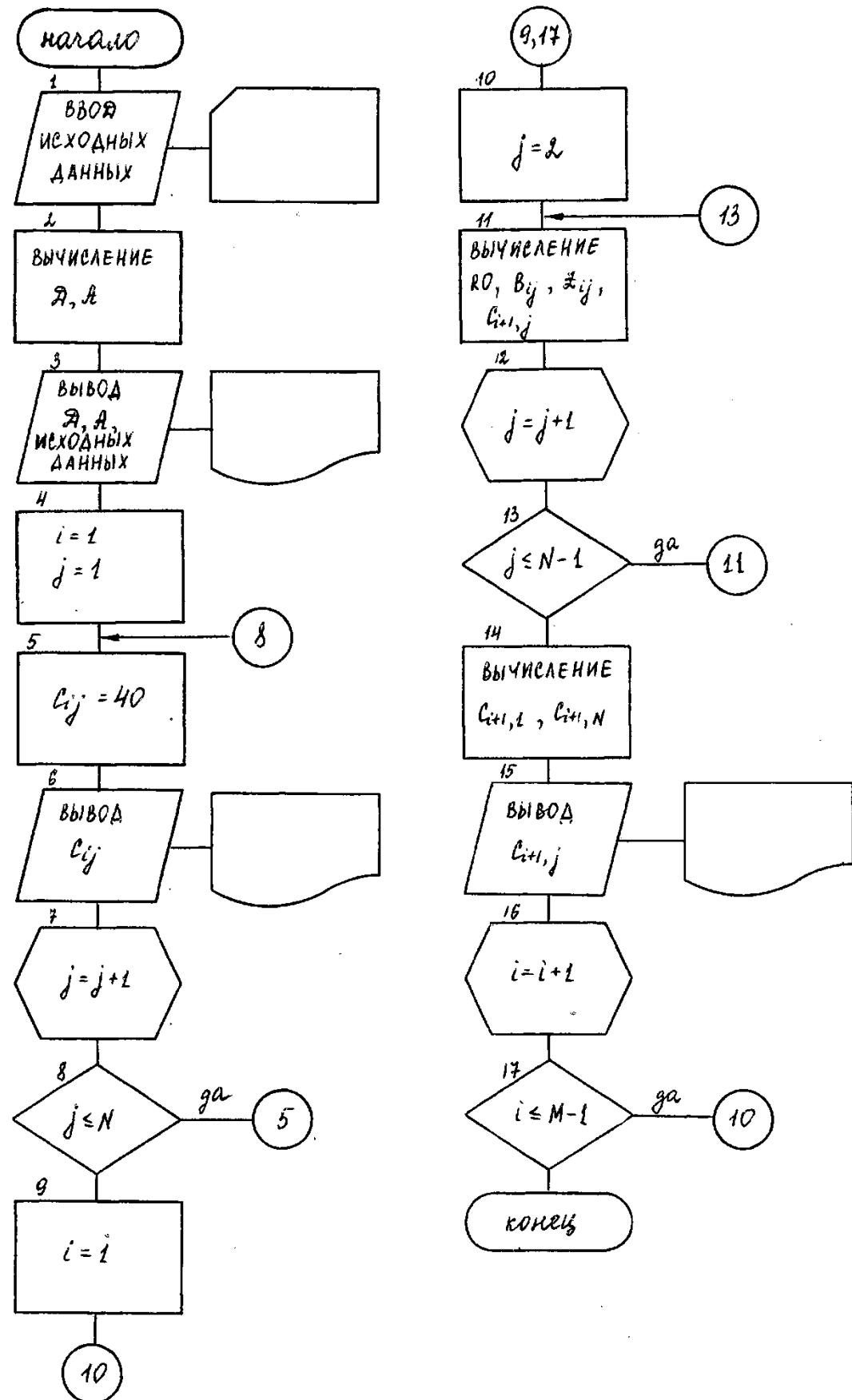


Рисунок 2.3 – Модель (1-Д)

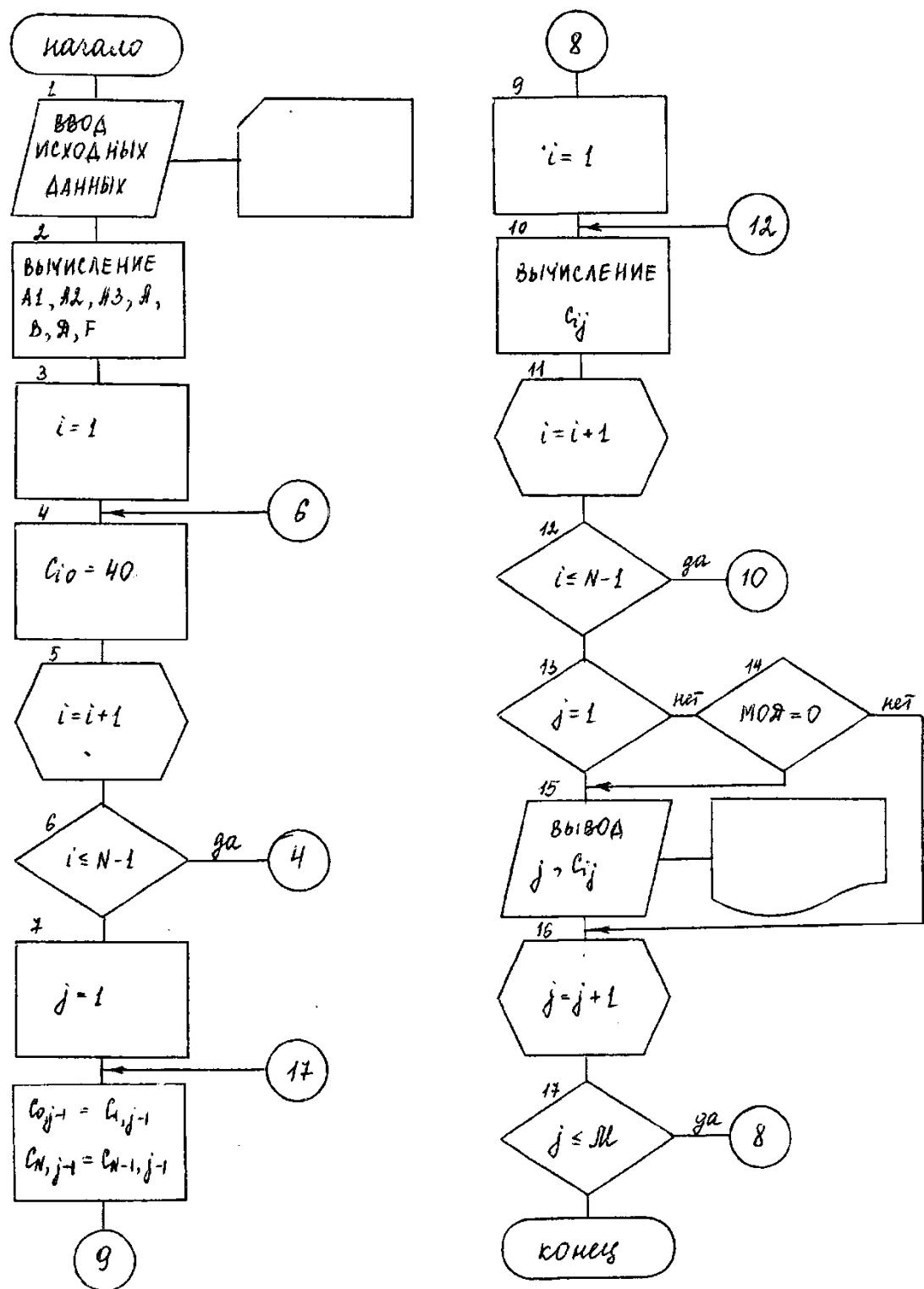


Рисунок 2.4 – Модель (2-Д)

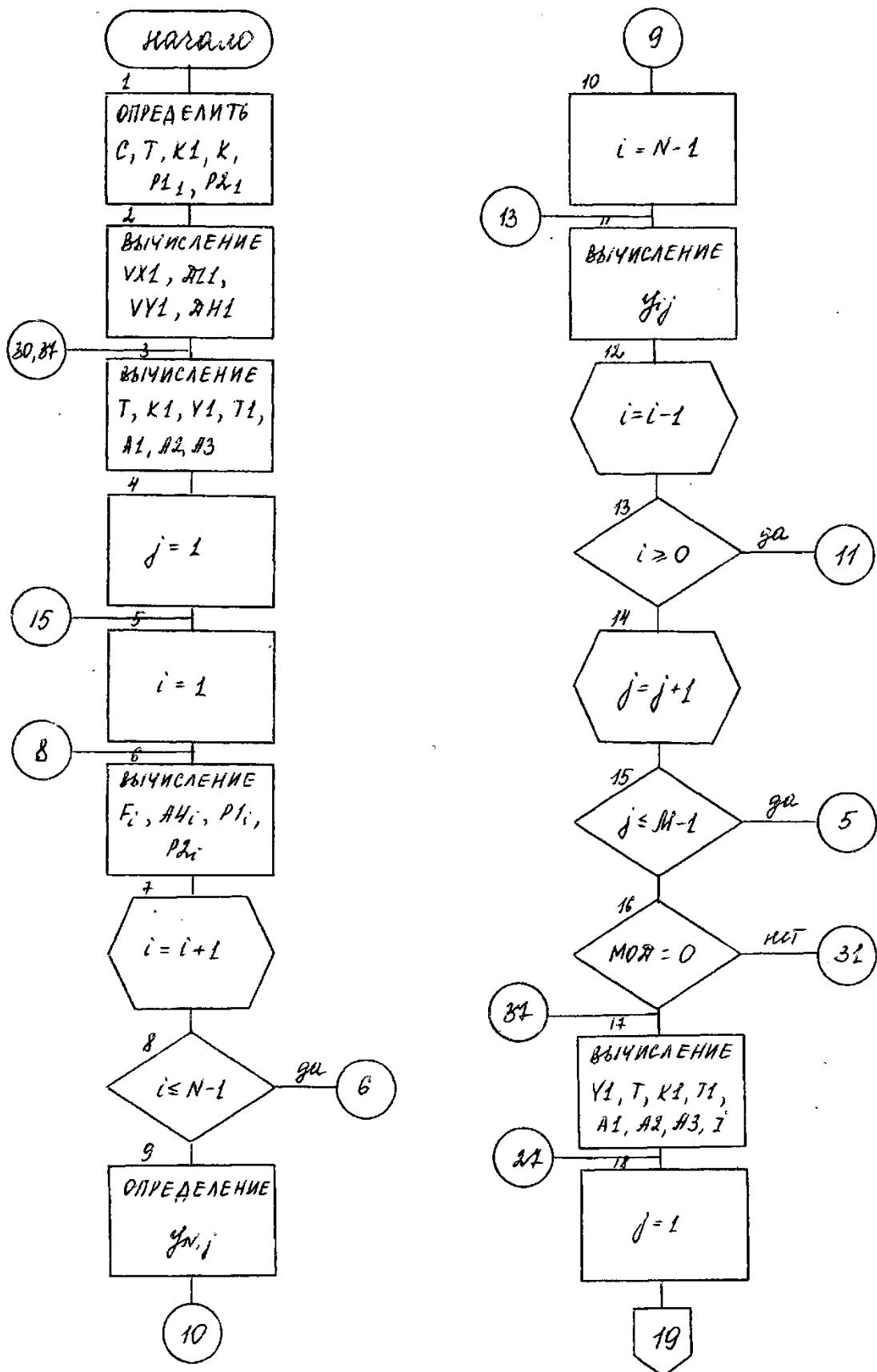


Рисунок 2.5 – Модель (2-Dcyl)

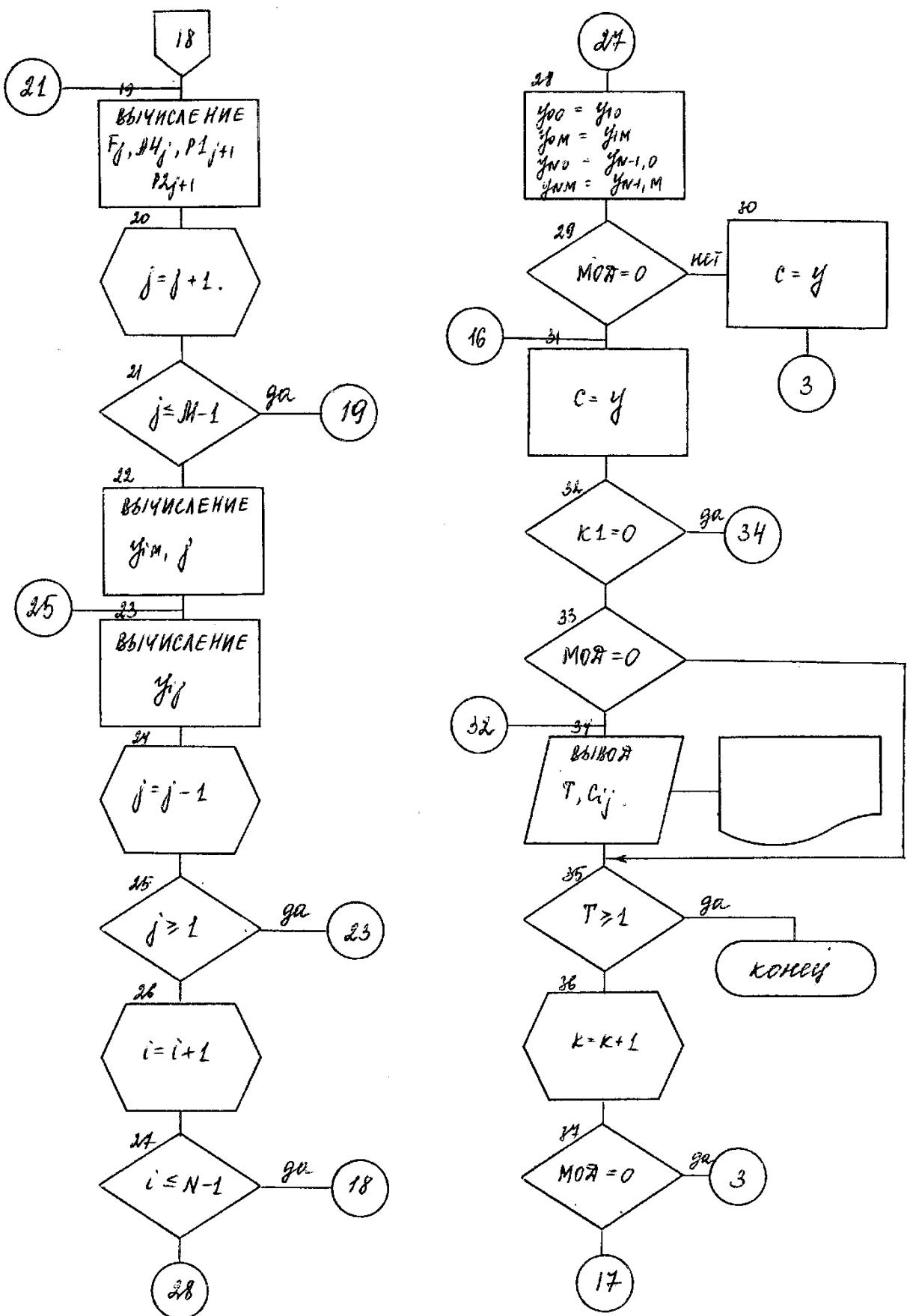


Рисунок 2.5 – Модель (2-Dcyl) (продолжение)

## 2.4.2 Результаты компьютерного моделирования

Целью моделирования является обоснование параметров аппарата, при которых обеспечивается максимально возможные показатели равномерности распределения концентрации смеси. В процессе исследований варьировались скорость вращения лопасти и ее геометрическое положение, а также координаты входных трубопроводов. Моделировались различные варианты изменения этих параметров и исследовалось их влияние на конечный результат.

Подробное описание результатов моделирования и полученные на их основе рекомендации по совершенствованию параметров приведены в работах автора [93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103].

### 2.4.2.1 Исследование влияние координат входных трубопроводов

На рисунке 2.6 приведены результаты моделирования для трех вариантов. Как показывают результаты, наиболее равномерное распределение достигается, когда оба источника находятся в одной точке.

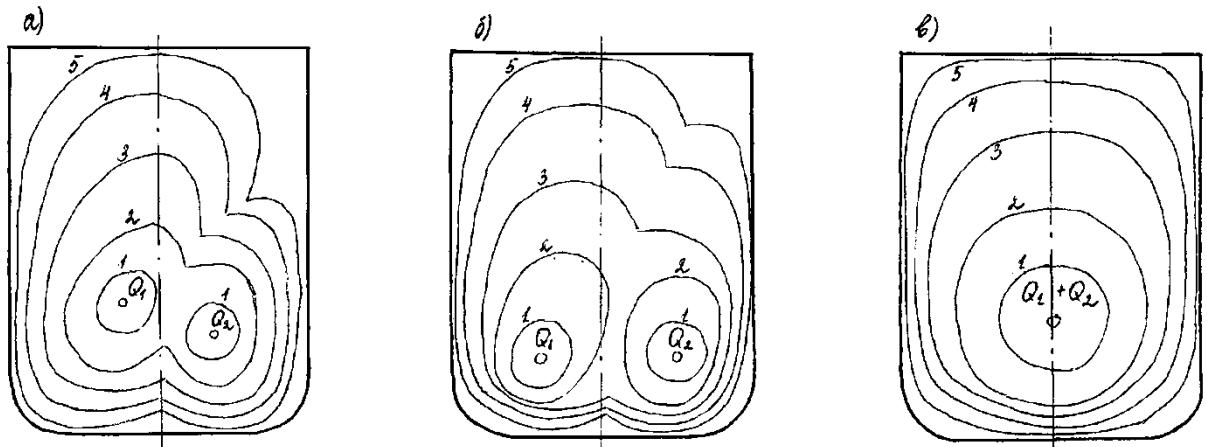


Рисунок 2.6 – Результаты моделирования распределения значений концентрации твердой фазы для различных положений источников:  
 а) случайное расположение; б) симметричные координаты; в) расположение в общей точке

#### 2.4.2.2 Исследование влияния скорости вращения лопасти

Моделировались варианты влияния скорости вращения при расположении лопасти на расстоянии четверти высоты от днища для безразмерных значений скоростей 0,5; 0,7; 0,9. На рисунке 2.7 приведены результаты моделирования, из которых видно, что чем выше скорость, тем меньше «залегание» твердой фазы на дне.

#### 2.4.2.3 Исследование влияния координат расположения лопасти

Моделирование проведено при скорости 0,7 и различных координатах положения лопасти вдоль вертикальной оси. Как следует из рисунка 2.8, наилучшим положением для борьбы с «залеганием осадка» является максимально приближенное положение к днищу.

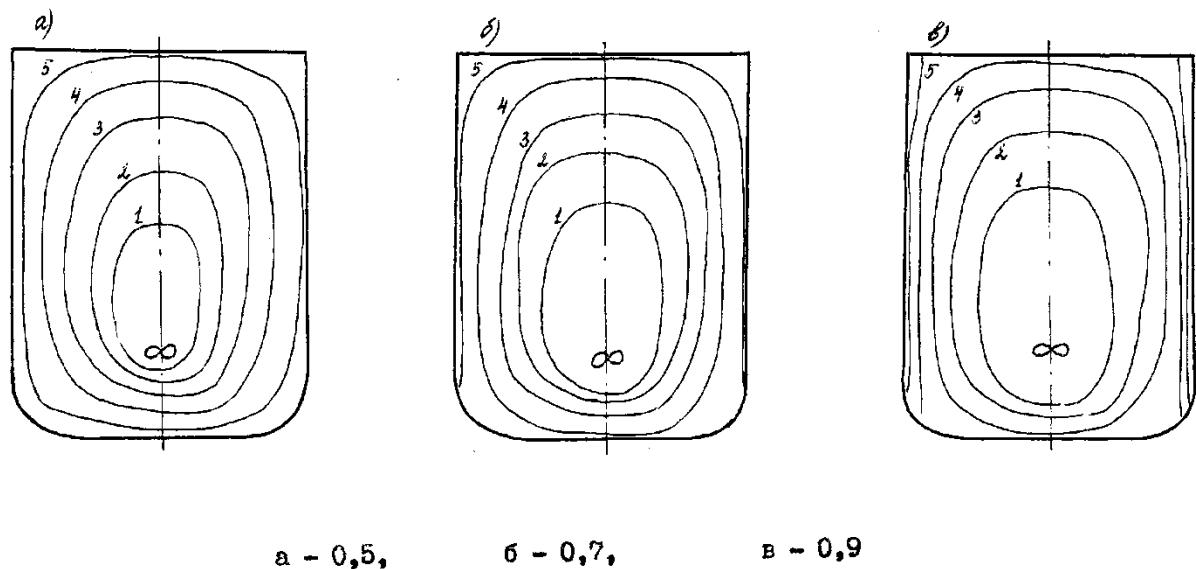


Рисунок 2.7 – Результаты моделирования процесса при различных скоростях вращения лопасти

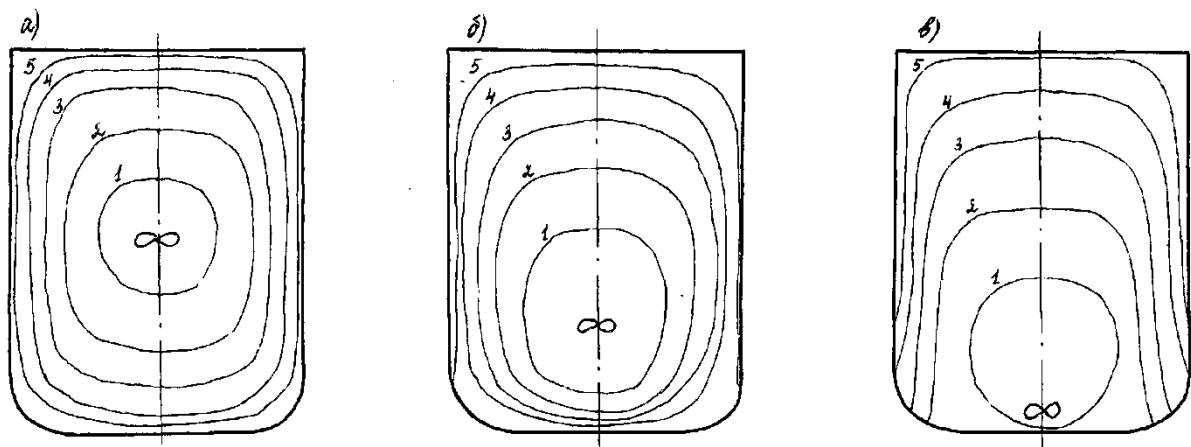


Рисунок 2.8 – Результаты исследования процесса при различных положениях лопасти:

а – в центре реактора; б – в четверть высоты; в – в придонной зоне

## 2.5 Исследование влияния дополнительных конструкций при модернизации аппаратуры

В исследованиях ряда авторов предложено ввести в рабочее пространство аппарата дополнительную конструкцию в виде диффузора с целью улучшения гидродинамических характеристик и качества конечного продукта.

На рисунке 2.9 приводится схематическое изображение сечения аппарата и схема для математического моделирования (диффузор моделируется отдельными непроницаемыми полосками).

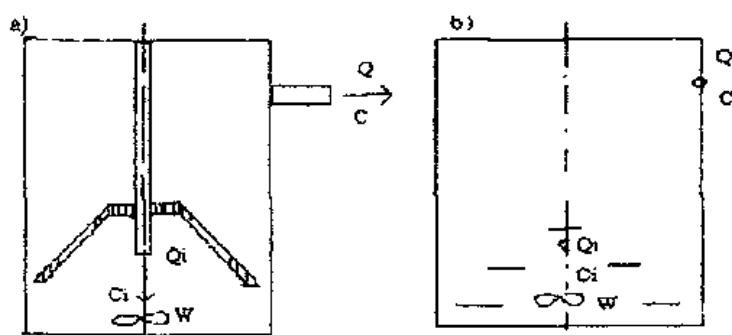


Рисунок 2.9 – Исследование процесса работы аппарата с диффузором:  
а) схематическое представление; б) моделируемая схема

На рисунках 2.10, 2.11 приведены результаты моделирования вариантов.

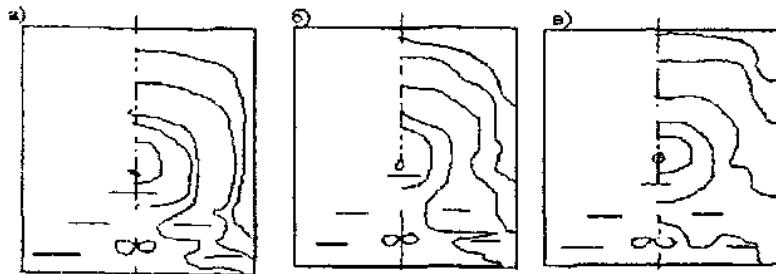


Рисунок 2.10 – Результаты моделирования при различных скоростях вращения лопасти в случае расположения источника над диффузором:  
а)  $W=360$  об/мин, б)  $W=540$  об/мин, в)  $W=720$  об/мин

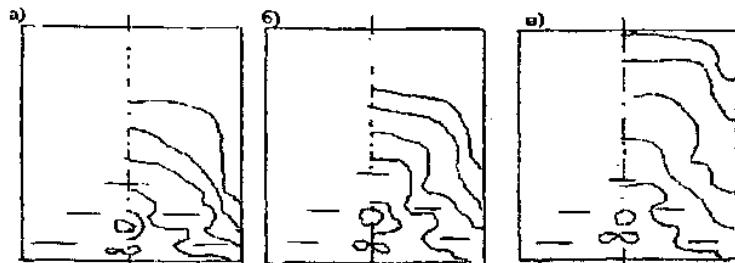


Рисунок 2.11 – Результаты моделирования в случае расположения источника под диффузором:  
а)  $W=360$  об/мин, б)  $W=540$  об/мин, в)  $W=720$  об/мин

## 2.6 Выводы и рекомендации по использованию результатов математического моделирования

В работе впервые решена задача построения детерминированных математических моделей, описывающих процесс функционирования однолопастных аппаратов конвективного типа, разработаны алгоритмы и программы для компьютерного исследования и обоснования направлений совершенствования оборудования.

Выполненные численные эксперименты позволили сформировать рекомендации по совершенствованию конструкций аппарата и улучшению основных параметров.

Разработанные программы могут быть применены к исследованию процессов подобного типа при проектировании аппаратов, работающих по принципу перемешивания реагирующих веществ.

Приведенные результаты позволяют обосновать первое научное положение:

*установлено, что основное влияние на процесс конвективного перемешивания многокомпонентных материалов оказывают геометрические параметры (координаты установки элемента вращения, координаты расположения входных трубопроводов для поступающих компонентов) и технологические (скорость вращения конвективного элемента).*

## 2.7 Выводы по разделу 2.

1. Впервые разработаны детерминированные математические модели процесса перемешивания многокомпонентной смеси в однолопастном конвективном аппарате.

2. Для решения задач исследования и совершенствования параметров выполнена численная реализация, разработаны алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие применять разработки в различных технологических схемах, использующих принцип конвективного воздействия.

3. Выполнены численные эксперименты по исследованию параметров аппаратов, результаты которых позволили сформировать рекомендации по совершенствование конструкций аппарата в направлении модификации гидродинамических и геометрических параметров.

4. Для дальнейшего использования разработанного комплекса программ к решению задач математического моделирования работы аппаратов подобного типа показаны направления доработка программ в зависимости от характера исследуемых процессов.

## РАЗДЕЛ 3

РАСШИРЕНИЕ ПАКЕТА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА И  
ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

На современном этапе дальнейшее развитие науки и техники немыслимо без всесторонней информатизации и автоматизации процессов. Особенно остро эта проблема стоит при проектировании новых и модификации используемых устройств и процессов. Традиционные методы расчета параметров и проектирования носят экстенсивный характер, они были эффективны до определенного момента – момента так называемого «насыщения», когда на первый план выдвигается необходимость перехода к интенсивным методам проектирования [102, с.120, 103, с.185].

С этой целью разрабатывается подсистема автоматизированного проектирования технологических схем, призванная повысить качество проектов за счет эффективного применения компьютерных технологий для реализации трудоемких рутинных функций [104, 105, 106].

Процесс проектирования включает ряд этапов, в том числе рассмотрение и оценка вариантов проектов, обоснование и верификация принимаемых проектных решений. По мере усложнения технологий, расширения числа возможных вариантов проектов возникает необходимость автоматизации процесса проектирования с применением методов математического моделирования и компьютерных технологий.

Теоретическую основу системы составляет пакет математических моделей, имитирующих процесс функционирования оборудования [107, 108, 109].

На основании построенной математической модели могут быть разработаны рекомендации, предназначенные для работников служб и подразделений предприятий, выполняющих работы по проектированию и эксплуатации технологических схем и оборудования.

Аппроксимация расчетных соотношений основывается на линеаризации и максимальном упрощении уравнений, описывающих процесс [110, 111, 112].

### 3.1 Аппроксимация математической модели процесса путём редукции краевой задачи к системе критериальных зависимостей

При обогащении ряда полезных ископаемых после извлечения основного продукта остаются отходы, содержащие спектр различных веществ, некоторые из которых имеют заметное содержание. В настоящее время проблеме переработке «хвостов» обогащения уделяется серьезное внимание, при этом важное значение для совершенствования технологии имеет исследование процессов методом математического моделирования. В этой связи тема работы является актуальной.

В результате работы горнодобывающих предприятий и обогатительных фабрик остаются породные отвалы, отрицательно влияющие на состояние окружающей среды. Их удаление требует значительных материальных и трудовых затрат. Вместе с тем, эти отвалы содержат множество полезных элементов, извлечение которых дает значительный экономический эффект. Поэтому проблема разработки способов и совершенствования технологии занимает все более важное место в экономике.

Ряд неметаллических материалов, используемых в технике (в частности, ферриты), получаются путем осаждения твердой фазы из суспензии [108, с.170]. Математические модели процессов получения суспензии в аппаратах с конвективными компонентами основываются на уравнениях в частных производных и позволяют исследовать основные параметры технологического оборудования. Вместе с тем, для оперативного расчета параметров процесса важно иметь приближенные зависимости, позволяющие обойтись без применения компьютера. Задачей данной работы является разработка модели, основанной на критериальных зависимостях.

В математической постановке задача сводится к построению функциональной зависимости диаметра частицы твердой фазы (кристалла) от следующих параметров: концентраций поступающих компонент, их расхода, угловой скорости вращения мешалки, рабочей камеры размеров аппарата, вязкости среды, температуры смеси в аппарате, времени зарождения частицы, pH – среды, веса частицы и времени пребывания ее в рабочей камере. При этом следует учитывать, что удельная поверхность обязана быть величиной в пределах  $0,2 \pm 0,05 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Построим критериальное уравнение роста диаметра кристалла  $d$ , исходя из следующей зависимости:

$$d=f(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, Q_1, Q_2, Q, \omega, D, H, T, \tau, pH, \nu, p, q, \theta_1, \theta_2), \quad (3.1)$$

где  $C_k$  – концентрации исходных веществ;

$Q_k$  – расход их поступления;

$Q$  – расход на выходе;

$\omega$  – угловая скорость вращения мешалки;

$D, H$  – диаметр и высота рабочей камеры;

$T$  – время пребывания кристалла (старения) в аппарате;

$\tau$  – время зарождения;

$\nu$  – вязкость;

$q$  – ускорение свободного падения (т. е. учёт массовых сил);

$p$  – давление;

$\theta_1$  – температура смеси;

$\theta_2$  – температура окружающей среды.

Выберем размерности входных параметров следующими:

$$C_k = [\text{кмоль}/\text{м}^3], Q_k = [\text{кг}/\text{с}], \omega = [\text{Т/с}], D = [\text{м}], H = [\text{м}], T = [\text{с}], \tau = [\text{с}], \nu = [\text{м}^2/\text{с}], \\ \theta_k = [\text{град}], p = [\text{кг}/\text{м} \times \text{с}^2], q = [\text{м}^2/\text{с}]$$

Далее, пусть  $l$  – длина в метрах,  $t$  – время в секундах,  $m$  – масса в кг,  $\chi$  – температура в градусах. Тогда исходя из (3.1) построим алгебраическую зависимость:

$$l = k \cdot \left( \frac{m}{l^3} \right)^{x_1} \left( \frac{m}{l^3} \right)^{x_2} \left( \frac{m}{l^3} \right)^{x_3} \left( \frac{m}{l^3} \right)^{x_4} \left( \frac{m}{l^3} \right)^{x_5} \left( \frac{m}{t} \right)^{y_1} \left( \frac{m}{t} \right)^{y_2} \left( \frac{m}{t} \right)^{y_3} \left( \frac{1}{t} \right)^n \times \\ l^{z_1} l^{z_2} t^j t^\rho (pH)^\alpha \left( \frac{l^2}{t} \right)^\beta \left( \frac{l}{t^2} \right)^\gamma \left( \frac{m}{lt^2} \right)^\lambda \chi^{\mu_1} \chi^{\mu_2}$$

Отсюда следует система линейных уравнений:

$$l: \quad 1 = 3x + z_1 + z_2 + 2\beta + \gamma + \lambda;$$

$$m: \quad 0 = x + y + \lambda;$$

$$t: \quad 0 = -y - n + j + \rho - \beta - 2\gamma - 2\lambda;$$

Здесь:

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5; \quad y = y_1 + y_2 + y_3.$$

Из второго уравнения находим:

$$\lambda = -(x + y).$$

Подставляем найденное значение в первое и третье уравнение получаем:

$$l = -3x + z_1 + z_2 + 2\beta + \gamma + y$$

$$0 = -y - n + j + \rho - \beta - 2\gamma - 2(x + y)$$

Откуда следует система линейных уравнений для нахождения  $\beta$  и  $\gamma$ :

$$2\beta + \gamma = l + 2x - (z_1 + z_2) - y \\ \beta + 2\gamma = y + n - j - \rho - 2(x + y). \quad (3.2)$$

Решив систему (3.2), получим:

$$\gamma = \frac{2}{3}j + \frac{2}{3}\rho - \frac{2}{3}n + y + \frac{2}{3}x - \frac{1}{3} + \frac{1}{3}(z_1 + z_2);$$

$$\beta = -\frac{1}{3} - \frac{\rho}{3} + \frac{n}{3} - y + \frac{2}{3}x + \frac{2}{3} - \frac{2}{3}(z_1 + z_2);$$

$$\lambda = -(x + y); \quad x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5; \quad y = y_1 + y_2 + y_3;$$

$$\mu_1 + \mu_2 = 0.$$

Таким образом, приходим к следующей зависимости:

$$d = k C_1^{x_1} C_2^{x_2} C_3^{x_3} C_4^{x_4} C_5^{x_5} Q_1^{y_1} Q_2^{y_2} Q^{y_3} w^n D^{z_1} H^{z_2} T^j \tau^\rho (pH)^\alpha v^{\frac{j\rho + n}{3} - y + \frac{2}{3}x - \frac{2}{3}(z_1 + z_2)} \times \\ \times q^{\frac{2}{3}j + \frac{2}{3}\rho - \frac{2}{3}n + y + \frac{2}{3}x - \frac{1}{3} + \frac{1}{3}(z_1 + z_2)} p^{-(x + y)} \theta_1^{\mu_1} \theta_2^{\mu_2} \quad (3.3)$$

Отсюда следует критериальное уравнение:

$$\begin{aligned}
d \cdot \frac{q^{1/3}}{v^{1/3}} = k \cdot & \left( C_1 \cdot \frac{v^{2/3} q^{2/3}}{\rho} \right)^{x_1} \left( C_2 \cdot \frac{v^{2/3} q^{2/3}}{\rho} \right)^{x_2} \left( C_3 \cdot \frac{v^{2/3} q^{2/3}}{\rho} \right)^{x_3} \left( C_4 \cdot \frac{v^{2/3} q^{2/3}}{\rho} \right)^{x_4} \times \\
& \times \left( C_5 \cdot \frac{v^{2/3} q^{2/3}}{\rho} \right)^{x_5} \left( \frac{Q_1 \cdot q}{v\rho} \right)^{y_1} \left( \frac{Q_2 \cdot q}{v\rho} \right)^{y_2} \left( \frac{Q \cdot q}{v\rho} \right)^{y_3} \left( \frac{\omega \cdot v^{1/3}}{q^{2/3}} \right)^n \left( \frac{D \cdot q^{1/3}}{v^{2/3}} \right)^{z_1} \left( \frac{H \cdot q^{1/3}}{v^{1/3}} \right)^{z_2} \times \\
& \times \left( \frac{T \cdot q^{2/3}}{v^{1/3}} \right)^j \left( \frac{\tau \cdot q^{2/3}}{v^{1/3}} \right)^\rho \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^\mu (pH)^\alpha
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Здесь  $k$  – коэффициент пропорциональности. Уравнение (3.4) содержит 15 безразмерных комплексов (1), причем число переменных  $n=19$ , а число измерений  $m=4$ , т. е.  $n-m=15$ .

Неизвестные числа  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, y_1, y_2, y_3, n, z_1, z_2, j, \rho, \mu, \alpha$  определяются методом Монте-Карло при условии, что величины  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, Q_1, Q_2, Q, \omega, D, H, T, \tau, pH, v, \rho, \theta_1, \theta_2$  известны (либо определены опытным путем).

Итак, считая формулу (3.4) известной, определяем теперь удельную поверхность по формуле:

$$S_{y\vartheta} = \frac{6000}{d \cdot \rho} \tag{3.5}$$

При численной реализации задачи были использованы следующие численные значения параметров:

$C_1=185,3$  г/л (концентрация  $FeSO_4$ ),

$C_2=20,6$  г/л (концентрация  $ZnSO_4$ ),

$C_3=57,3$  г/л (концентрация  $MnSO_4$ ),

$C_4=2,5$  г/л (концентрация  $NiSO_4$ ),

$C_5=210$  г/л (концентрация  $NH_4HCO_3$ ),

$Q_1=25-30$  л/мин (поступление смеси растворов солей  $Fe, Mn, Zn, Ni$ )

$Q_2=40-60$  л/мин (поступление углеаммонийной соли),

$V=9$  м<sup>3</sup> (объем цилиндрического реактора),

$R=0,5m$ ,

$T=40-80$  мин. (время пребывания кристалла в реакторе),

$\tau=5$  сек. (время зарождения кристалла),

$\theta_1=50^\circ-55^\circ\text{C}$  (температура процесса осаждения)

$\omega=(100-1000)$  об/мин (угловая скорость вращения мешалки),

$S_{y\omega}=0,2\pm0,05$  (удельная поверхность твердого осадка),

$\nu=0,7$  (вязкость жидкой фазы)

$\rho=1250$  кг/м<sup>3</sup> (плотность суспензии)

Критериальные уравнения (3.4), (3.5) позволяют найти  $S_{y\omega}$  при различных значениях расходов  $Q_1$ ,  $Q_2$  и угловой скорости вращения мешалки  $\omega$ . Полученные результаты считаются допустимыми, если  $S_{y\omega} \in [0,15; 0, 25]$  г/м<sup>2</sup>.

В таблице 3.1 указаны значения  $S_{y\omega}$  при  $Q_1=0,525$ ;  $Q_2=0,875$  и различных значениях  $\omega$ .

В таблице 3.2 приводятся значения  $S_{y\omega}$  при  $\omega=5$ ,  $Q_2=0,875$  и различных  $Q_1$ ,  $0,405 < Q_1 < 0,885$  с шагом 0,06.

В таблице 3.3  $\omega=5$ ,  $Q_1=0,525$ ,  $0,405 \leq Q_2 \leq 0,885$  с шагом 0,06.

Таблица 3.1 – Расчет  $S_{y\omega}$  в зависимости от  $\omega$

$\omega$	$Q_1$	$Q_2$	$S_{y\omega}$
1,67	0,525	0,875	0,033
3,34	–"–	–"–	0,107
5,01	–"–	–"–	0,215

Таблица 3.2 – Расчет  $S_{y\omega}$  при различных  $Q_1$

$\omega$	$Q_1$	$Q_2$	$S_{y\omega}$
5	0,405	0,875	0,16
5	0,465	0,875	0,19
5	0,525	0,875	0,21
5	0,585	0,875	0,24
5	0,585	0,875	0,24
5	0,645	0,875	0,26
5	0,705	0,875	0,28
5	0,765	0,875	0,31
5	0,825	0,875	0,33
5	0,885	0,875	0,35

Таблица 3.3 – Расчет  $S_{y\vartheta}$  при различных  $Q_2$ 

$\omega$	$Q_1$	$Q_2$	$S_{y\vartheta}$
5	0,525	0,405	0,16
5	0,525	0,465	0,17
5	0,525	0,525	0,18
5	0,525	0,585	0,19
5	0,525	0,645	0,193
5	0,525	0,705	0,2
5	0,525	0,765	0,205
5	0,525	0,825	0,21
5	0,525	0,885	0,213

Построенная критериальная модель на базе установленного функционального соотношения позволяет исследовать численным путем зависимость диаметра кристалла  $d$  от 19 переменных ( $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, Q_1, Q_2, Q, \omega, D, H, T, \tau, \text{pH}, v, \rho, \theta_1, \theta_2$ ). Практически важным является исследование диаметра  $d$  в зависимости от расходов  $Q_1, Q_2$  и угловой скорости вращения мешалки  $\omega$ . Результаты численных просчётов позволяют установить соответствующие зависимости.

Укажем также, что данной зависимостью можно пользоваться при прогнозировании величины  $S_{y\vartheta}$  в зависимости от основных параметров при помощи компьютера.

### 3.2 Оценки эффективности воздействия в зависимости от параметров

#### 3.2.1 Критерии оценки эффективности

Выбор критериев оценки повышения эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объёме аппарата.

Выделим в сечении аппарата 3 характерные зоны (рисунок 3.1):

I – зона активного перемешивания;

II – зона «пристеночного залипания»;

III – зона «придонного залегания».

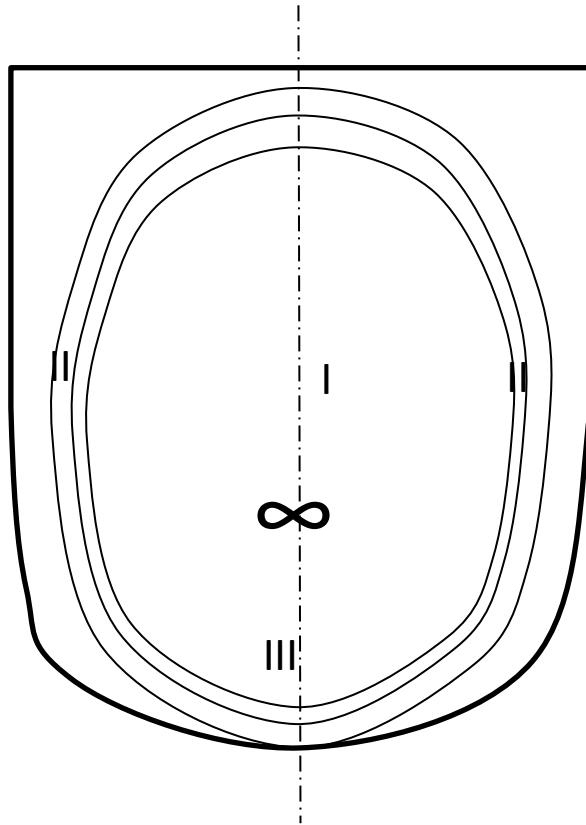


Рисунок 3.1 – Условная схема распределения концентрации

Наиболее эффективные результаты работы конвективного аппарата соответствуют максимально возможному размеру зоны I.

Равномерность обработки достаточно полно определяется наличием зон II, III и степенью преобладания площади зоны I в проектной области воздействия. В связи с этим для оценки качества обработки выбраны:

$\nu$  - коэффициент относительной величины зон низкой активности

$$\nu = \frac{S_H}{S_{PP}} \cdot 100, \% \quad (3.6)$$

где  $S_H$  – площадь зон II, III (зоны низкой активности);

$S_{PP}$  – площадь проектной зоны воздействия.

Коэффициент вариации относительного прироста концентрации прореагировавших компонентов, определяемого по величине концентрации в каждой точке:

$$V_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta C_i - \Delta \bar{C})^2}}{\Delta \bar{C}} \cdot 100, \% \quad (3.7)$$

где  $\Delta C_i$  и  $\Delta \bar{C}$  – значения прироста концентрации соответственно в  $i$ -й точке и среднее по обрабатываемой зоне,

$$\Delta C_i = \frac{\Delta C_{\text{расч.}i}}{\Delta C_{\text{max}}}, \quad (3.8)$$

где  $\Delta C_{\text{расч.}i}$  – прирост концентрации в  $i$ -й точке по результатам моделирования;

$\Delta C_{\text{max}}$  – максимальный прирост концентрации.

Для оценки эффективности воздействия в зависимости от модификации параметров будем пользоваться величинами, определяющими:

а) относительное уменьшение площади зон низкой активности

$$\mathcal{E}_S = \frac{S_{H.O} - S_{H.K}}{S_{H.O}} \cdot 100, \% \quad (3.9)$$

где  $S_{H.O}$  и  $S_{H.K}$  – площади зон низкой активности соответственно при начальном значении параметра и конечном (модифицированном) значении;

б) уменьшение коэффициента вариации относительного прироста:

$$\mathcal{E}_v = \frac{V_R^0}{V_R^k} \quad (3.10)$$

где  $V_R^0, V_R^k$  – коэффициенты вариации соответственно для начального и конечного (модифицированного) значения параметра.

### 3.2.2 Исследование эффективности процесса в зависимости от параметров технологической схемы

#### 3.2.2.1 Влияние скорости вращения лопасти

Зададим положение лопасти на расстоянии четверти высоты от днища и проведем моделирование для скоростей 0,5; 0,7; 0,9. На рисунке 2.7

приведено распределение концентраций для этих случаев. На рисунке видно, что чем выше скорость, тем меньше «залегание» твердой фазы на дне.

Используя критерии (3.6) – (3.10), проведём сравнительные оценки эффективности для разных значений скорости вращения конвективного элемента.

Результаты компьютерных экспериментов приведены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Изменение равномерности распределения концентрации при наращивании скорости вращения лопасти

№ варианта	Исходное распределение		Равномерность распределения				Эффективность процесса	
			$\omega_0$		$\omega_k$			
	$V_R, \%$	$S_H, \text{м}^2$	$\nu, \%$	$V_R^0, \%$	$\nu, \%$	$V_R^k, \%$	$\mathcal{E}_s, \%$	$\mathcal{E}_v$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	42,3	42	13,3	48,4	4,3	26,5	67,6	1,8
2	50,3	16	16,6	60,9	7,2	28,9	56,5	2,1
3	70,6	80	17,8	62,3	6,9	30,2	60,2	2,1
4	76,3	12	14,8	59,6	5,5	32,5	62,7	1,8
5	81,8	20	18,1	63,2	6,6	34,4	63,5	1,8
6	82,6	64	19,1	56,5	7,3	33,8	61,8	1,6
7	86,1	60	17,4	60,0	7,9	35,8	54,6	1,7
8	96,5	64	19,6	66,3	8,4	34,2	57,1	1,9
9	108,6	80	22,6	70,3	11,8	45,0	47,7	1,6
10	112,3	40	23,7	64,1	9,7	31,6	59,0	2,0
<b>Среднее</b>			18,3	60,6	7,6	34,4	58,5	1,8

### 3.2.2.2 Влияние положения лопасти

Зададим скорость 0,7 и рассмотрим различные положения вдоль вертикальной оси. На рисунке 2.8 приведены результаты моделирования для этих случаев. Как следует из рисунка, наилучшим положением для борьбы с «залеганием осадка» является максимально приближенное к днищу.

Используя критерии (3.6) – (3.10), проведём сравнительные оценки эффективности для разных вариантов расположения лопасти относительно днища  $h_x$ .

Результаты компьютерных экспериментов приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Изменение равномерности распределения концентрации при изменении положения лопасти

№ варианта	Равномерность распределения				Эффективность процесса			
	$h_x^0$		$h_x^k$		$h_x^0$		$h_x^k$	
	$\nu, \%$	$V_R^0, \%$	$\nu, \%$	$V_R^k, \%$	$\mathcal{E}_s, \%$	$\mathcal{E}_v, \%$	$\mathcal{E}_s, \%$	$\mathcal{E}_v, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,2	27,3	3,0	24,3	68,4	1,8	77,5	2,0
2	4,8	31,2	2,2	25,7	71,0	1,9	86,7	2,4
3	5,1	30,5	2,3	24,8	71,3	2,0	87,0	2,5
4	3,4	25,1	2,6	22,2	77,1	2,4	82,4	2,7
5	4,3	30,2	2,9	25,3	76,2	2,1	84,0	2,5
6	6,3	30,6	4,6	28,1	67,0	1,8	75,8	2,0
7	4,5	31,4	4,1	26,2	74,1	1,9	76,4	2,3
8	4,4	33,0	2,3	28,0	77,4	2,0	88,4	2,3
9	8,5	42,6	4,2	35,8	62,3	1,6	81,4	2,0
10	8,1	40,1	3,8	31,3	65,7	1,6	83,9	2,0
<b>Ср. знач.</b>	<b>5,4</b>	<b>32,2</b>	<b>3,2</b>	<b>27,1</b>	<b>70,5</b>	<b>1,9</b>	<b>82,6</b>	<b>2,2</b>

Приведенные результаты позволяют обосновать второе научное положение:

*показано, что обоснованные методы модификации параметров оборудования способствуют повышению эффективности процесса и качества получаемых материалов.*

### 3.3 Обоснование структуры системы автоматизированного проектирования (САПр)

Как указывалось выше, среди средств интенсификации процессов исследования и проектирования выделяются системы автоматизированного проектирования. С этой целью разрабатывается подсистема автоматизированного проектирования технологических схем, призванная

повысить качество проектов за счет эффективного применения компьютерных технологий для реализации трудоемких рутинных функций.

Процесс проектирования включает ряд этапов, в том числе рассмотрение и оценка вариантов проектов, обоснование и верификация принимаемых проектных решений. По мере усложнения технологий, расширения числа возможных вариантов проектов возникает необходимость автоматизации процесса проектирования с применением методов математического моделирования и ЭВМ.

На рисунке 3.2 приведена функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования (САПр) технологии процесса.

На основании построенной математической модели могут быть разработаны рекомендации, предназначенные для работников служб и подразделений предприятий, выполняющих работы по проектированию и эксплуатации технологических схем и оборудования.

Аппроксимация расчетных соотношений основывается на линеаризации и максимальном упрощении уравнений, описывающих процесс.

На рисунке 3.3 приведена обобщенная блок-схема алгоритма функционирования головной программы.

Блок 1 содержит информацию о составе и свойствах материала, поступающего на обработку. Информация представляется в виде массива или файла с как можно более полным набором характеристик.

В блоке 2 помещается информация о тех характеристиках конечного продукта, которые должны быть обеспечены в результате переработки.

Основные из них – это влажность и концентрация на выходе и производительность аппарата, однако в процессе исследований могут быть рассмотрены и другие показатели.

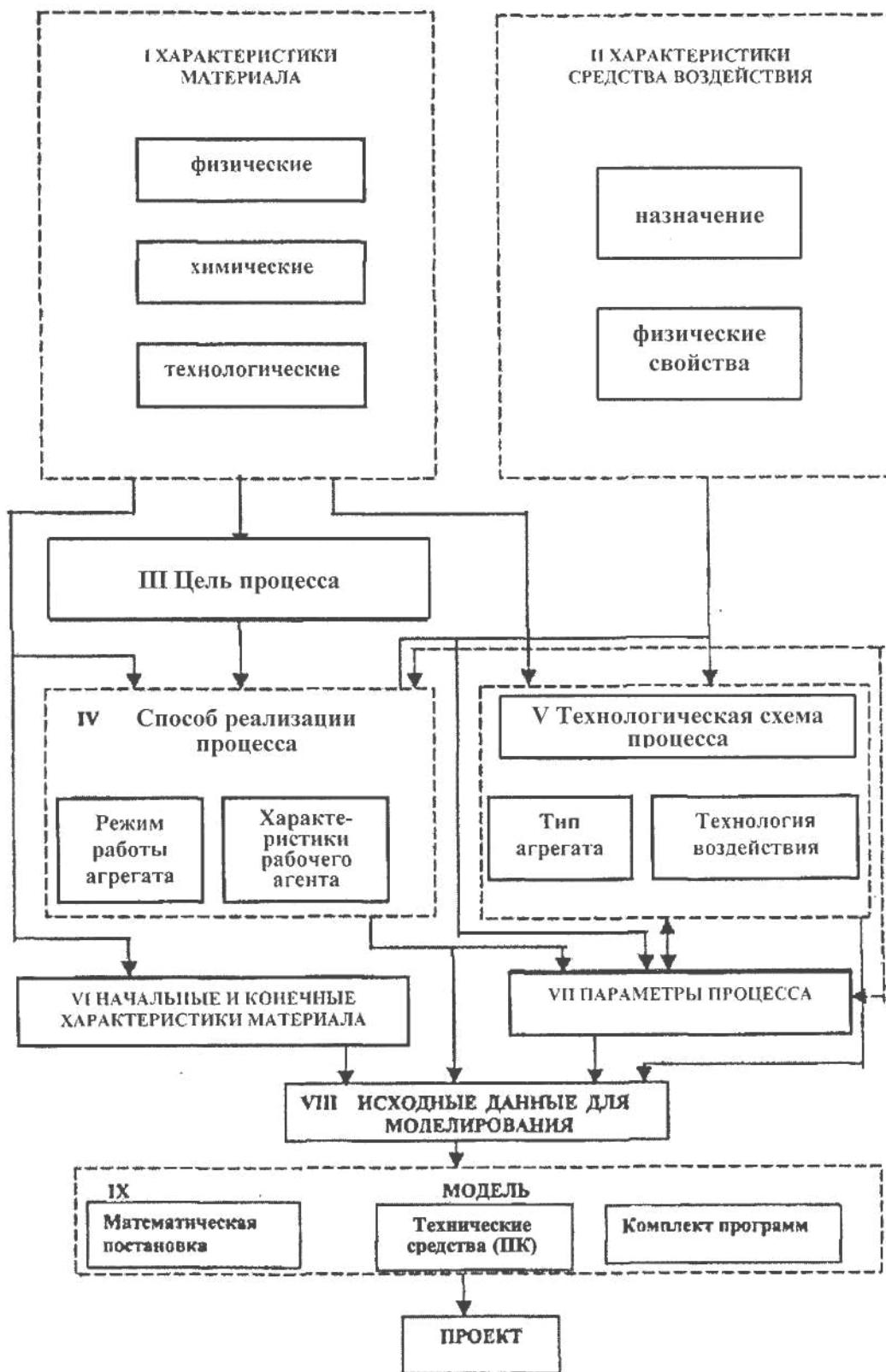


Рисунок 3.2 – Функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования технологических схем

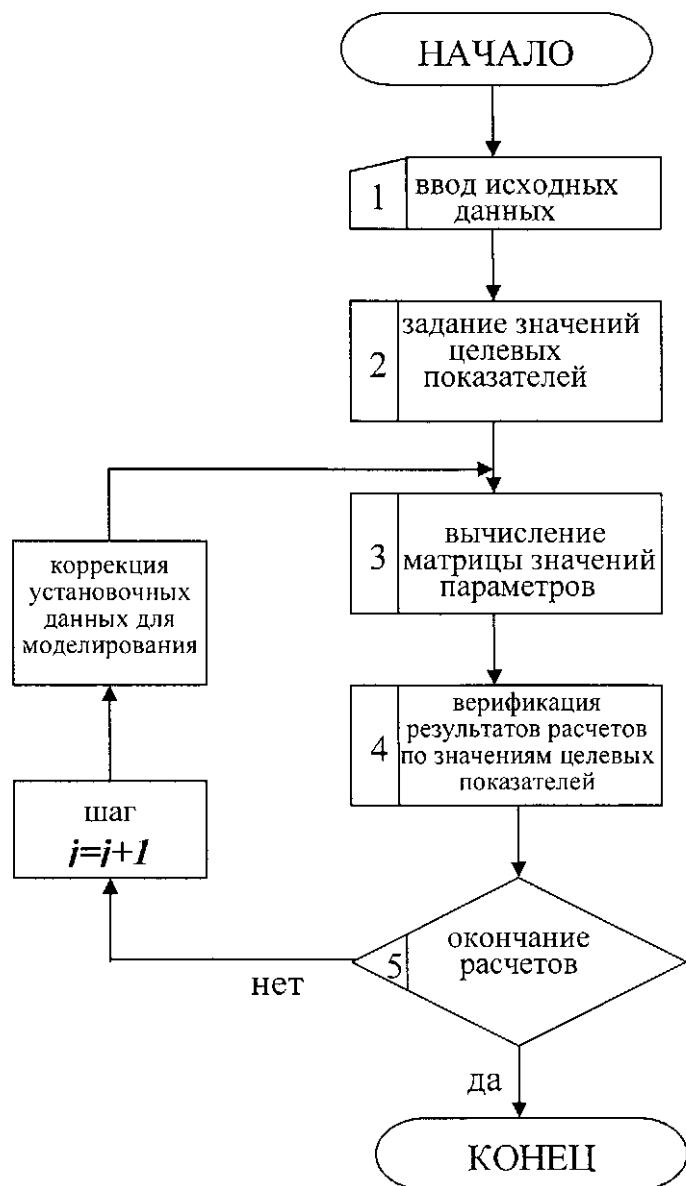


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритма головной программы

Блок 3 – основной расчетный блок. Здесь выполняется численная реализация всех математических моделей, включаемых в предметную область САПр. На данном этапе это математические модели распределения температуры материала в рабочем объеме аппарата, скорости частиц и концентрации обрабатываемого материала. Предложены детерминированные математические модели трех уровней для компьютерного моделирования процесса получения материалов в аппарате конвективного типа. Модели основаны на уравнениях в частных производных, краевые условия

сформированы согласно технологическим условиям. Выполнена численная реализация моделей методом конечно-разностной аппроксимации.

Предложенные модели и методы их реализации позволяют проводить численное моделирование процессов и решать задачи совершенствования как конструктивных, так и технологических параметров.

К достоинствам данного метода следует отнести возможность широкой вариации параметров без проведения физических и натурных экспериментов, что удешевляет и ускоряет процесс проектирования новой аппаратуры.

Как результат работы блока получаются значения указанных параметров и вычисляются все другие величины, характеризующие показатели работы установки.

В блоке 4 выполняется верификация расчетных значений параметров по заданным значениям показателей, определяющих требования к конечному продукту. Верификация может быть построена как по принципу «консенсуса», когда отклонение хотя бы одного параметра вызывает необходимость коррекции исходных данных и повторения моделирования, так и по интегральному принципу с использованием, например, метода наименьших квадратов.

Таким образом, разработана структура системы автоматизированного проектирования специализированного оборудования для вспомогательного процесса получения сопутствующего материала при обогащении полезных ископаемых, разработан алгоритм функционирования головной программы математического обеспечения системы.

Основным преимуществом системы автоматизированного проектирования является то, что с ее помощью удается получить достаточно полную информацию о различных вариантах проекта, при этом избежать массы рутинных операций и необходимости проведения значительного количества дорогостоящих экспериментов.

### 3.4 Выводы по разделу 3

1. Для обеспечения оперативных инженерных расчётов на основании редукции краевой задачи к системе алгебраических соотношений построена критериальная модель, которая позволяет исследовать численным путем зависимость диаметра кристалла получаемого в аппарате вещества  $d$  от 19 переменных. Результаты численных просчётов с использованием данной модели позволяют установить соответствующие инженерные зависимости. Данной зависимостью можно пользоваться при прогнозировании величины удельной поверхности твёрдой фазы  $S_{yd}$  в зависимости от основных параметров при помощи компьютера.

2. Разработаны критерии оценки повышения эффективности процесса конвективного перемешивания при модификации технологических параметров в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объёме аппарата.

3. С использованием разработанных критерииев проведено исследование эффективности процесса в зависимости от параметров технологической схемы, результаты которых подтверждают ранее полученные данные математического моделирования.

Разработана функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования (САПр) технологии процесса, на основании построенной математической модели разработан алгоритм функционирования головной программы математического обеспечения системы. По результатам исследований могут быть разработаны рекомендации, предназначенные для работников служб и подразделений предприятий, выполняющих работы по проектированию и эксплуатации технологических схем и оборудования.

## РАЗДЕЛ 4

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ  
КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ  
СМЕСИ

4.1 Назначение и структура системы автоматизированного управления процессом

Технология производства многих материалов промышленного назначения включает как базовый этап процесс конвективной обработки многокомпонентных смесей. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности.

В этой связи актуальной является задача модернизации технологических схем и оптимизации параметров процессов.

Исследованиями установлено, что основное влияние на процесс конвективного перемешивания многокомпонентных материалов оказывают геометрические параметры (координаты установки элемента вращения, координаты расположения входных трубопроводов для поступающих компонентов) и технологические (скорость вращения конвективного элемента и его позиционирование).

Выбор критериев оценки повышения эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объёме аппарата.

Модернизация геометрических параметров проводится на основании результатов математического моделирования процесса и являются стационарными характеристиками.

Динамической характеристикой являются технологические параметры – скорость вращения лопасти и её положение, следовательно, управляя этими

параметрами, можно влиять на качество процесса согласно разработанным критериям. Для реализации методов повышения эффективности процесса и качества продукции предлагается разработать систему автоматизированного управления процессом.

На первом этапе считаем, что стационарные параметры определены по результатам компьютерных исследований на основании разработанных математических моделей и программ, а процессом управляет система путём контроля и при необходимости коррекции динамических параметров (скорость вращения конвективного элемента и его положение). При этом в процессе работы оборудования проводится постоянный контроль качества и эффективности на основании критериев (3.6) – (3.10).

На втором этапе разработки системы можно ввести блок вариации стационарных параметров с последующими рекомендациями по их модификации.

Технически поставленную задачу можно решить на основе использования универсальных компьютеров, которыми в настоящее время оснащается каждое предприятие. Преимуществом этого пути является то, что для реализации задачи достаточно разработать специализированный пакет прикладных программ и обеспечить связь управляющей аппаратуры с компьютером. Однако при этом возникает ряд проблем, вызванных характером работы: объекты управления находятся нередко под землей, зачастую на большом удалении, нагнетание производится одновременно на нескольких участках, установки периодически передвигаются, а это требует создания дорогостоящих линий связи, их защиты, обеспечения мобильности. Поэтому на практике более предпочтительным является путь создания специализированного устройства управления, которое работает в непосредственной связи с технологическим оборудованием.

Исследования показали, что наиболее приемлемым в данном случае является применение специализированных устройств на базе микроконтроллера [105, с.135, 113].

Контролируемые параметры: скорость вращения  $\omega(t)$ ,  $t$  – текущее время). Перед началом процесса задаются исходные данные, устанавливается  $t = 0$ , запускается устройство контроля и управления (УКУ).

Проект системы включает набор специализированных электронных устройств, функционирование которых координируется с помощью программируемого микроконтроллера, и пакета программ. Структура базовой единицы системы приведена на рисунок 4.1.

Сигналы с датчиков в виде синусоидального напряжения поступают на вход преобразователей с целью согласования выходного напряжения датчика с уровнем входного напряжения микроконтроллера. В микроконтроллере реализуется прием, хранение и обработка данных, расчет фактических параметров и их сравнение с паспортными, а также выработка и выдача на регулятор управляющих сигналов, если необходимо корректировать их величину.

Критерий окончания процесса – достижение заданного показателя качества либо времени воздействия.

В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, либо в специализированном исполнении для использования в специальных условиях. В настоящее время свободно-программируемые контроллеры (ПК) приобрели законченную форму программно-технических устройств – это компьютер на микропроцессорной основе, отличающийся простотой программирования и технического обслуживания и приспособленный к эксплуатации в различных (в том числе и неблагоприятных) промышленных условиях (вибрация, нагрев, запыленность и т.д.) [114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122].

ПК состоит из четырех основных компонентов: центральный процессор

(ЦП), устройство ввода-вывода (УВВ), блок электропитания (БЭП), память программ (ПП). ЦП представляет собой основной блок ПК, координирующий обработку информации. В нем находится микропроцессорная логика, сканирующая программу и состояние блоков оборудования. УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК.

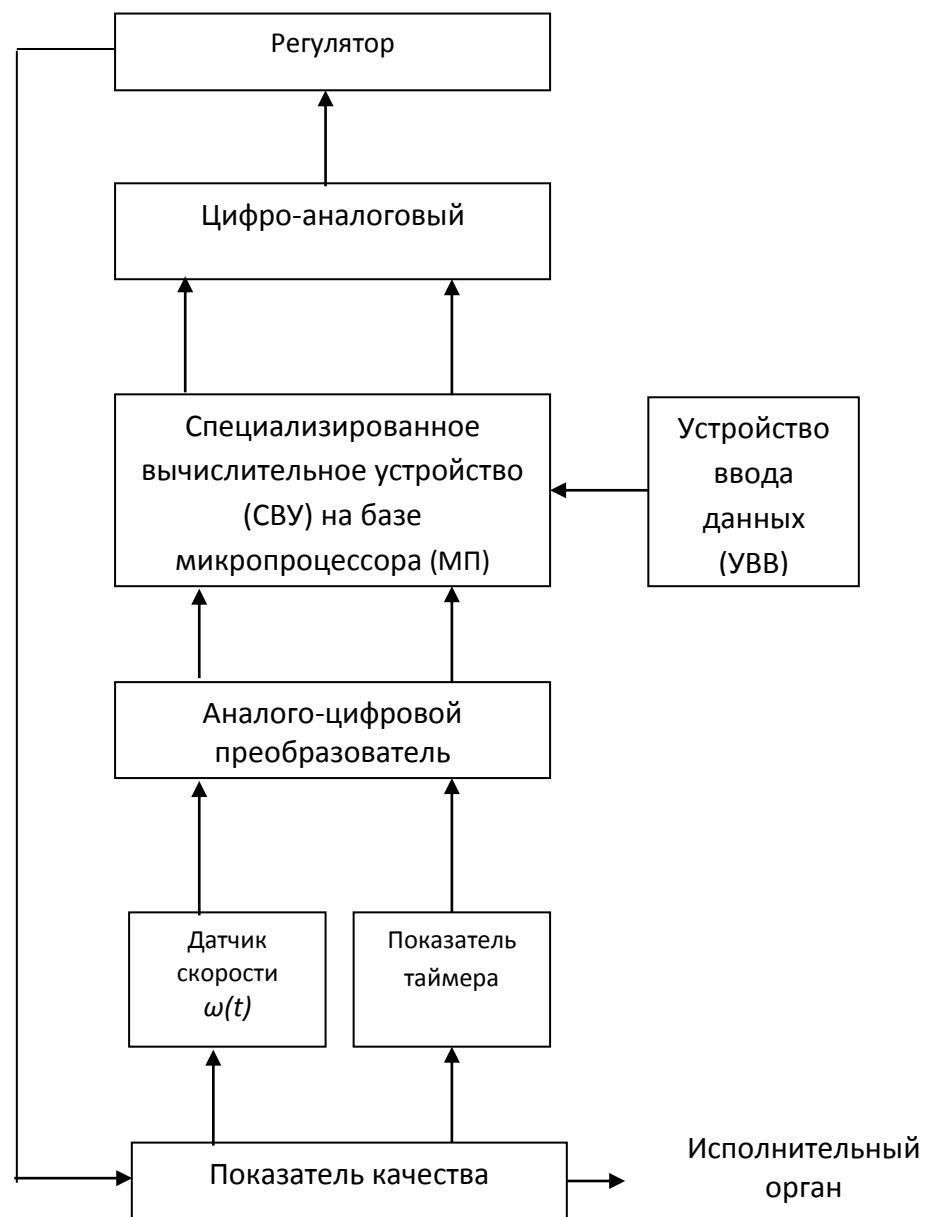


Рисунок 4.1 – Структура базовой единицы системы автоматизированного контроля и управления процессом

УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК. Источники сигналов ввода – датчики, кнопки, клавиатура и др. Адреса вывода – пускатели электродвигателей, контакторы, насосы и т.д. Дополнительно могут применяться специализированные аналоговые модули ввода-вывода (САМВВ).

Обобщенная схема ПК приведена на рисунке 4.2.

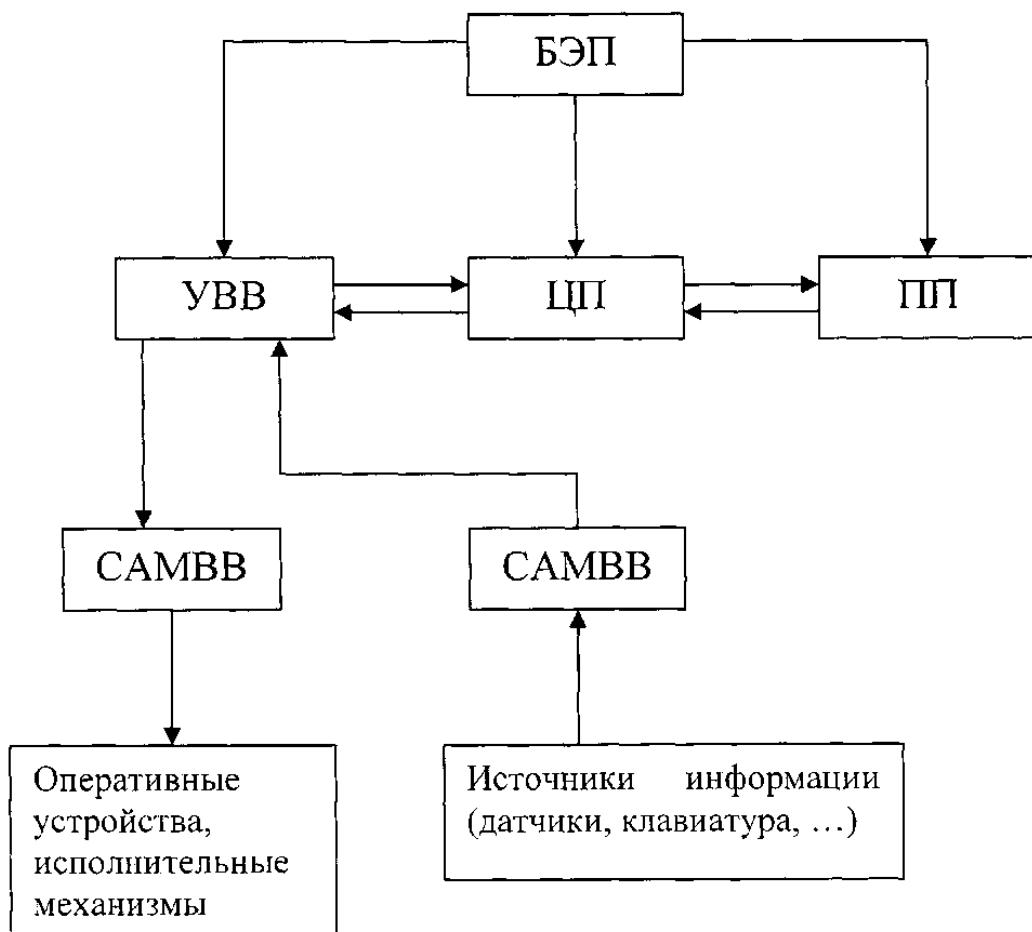


Рисунок 4.2 – Обобщенная схема программируемого контроллера (ПК)

БЭП преобразует сетевое напряжение в отфильтрованное стабилизированное электропитание ПК, ПП сохраняет программы управления.

Особенностью является то, что память программируется

пользователем. ПК программируют по цепной схеме, т.е. на языке, схожем с релейной логикой управления. При внесении изменений в программу к ПК подключают программирующее устройство и соответствующие изменения выполняют без перемонтажа. В течение кванта времени, определяемого частотой устройства управления, производится контроль текущего значения параметров и показателя качества.

Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата. В этой связи важное значение имеют быстродействие автомата и аппаратурные затраты, т.к. устройства устанавливаются на каждую установку.

Комплекс исходных данных, контролируемых, управляемых и управляющих параметров определяется характеристиками объекта и целями воздействия.

Таким образом, направлением дальнейшего развития и совершенствования системы является разработка проекта, на основании которого осуществляются все последующие мероприятия, а также выбор и модификация элементной базы конструирования системы и её подсистем.

#### 4.2 Элементная база системы управления

Обобщённая структура замкнутой системы автоматического управления представлена на рисунке 4.3, где ОА – операционный автомат, являющийся объектом управления, АР – аналоговый регулятор, реализующий алгоритм управления, ИМ – исполнительный механизм, действующий на ОА [113, 119, 120]. Регулируемая аналоговая величина  $f_a$  поступает на АР, характеризуя состояние ОА, здесь происходит сравнение с некоторым значением  $x_a$ . В соответствии с результатом сравнения АР вырабатывает сигнал  $y_a$ , управляющий ИМ таким образом, чтобы регулируемая величина  $f_a$  была равна заданной  $x_a$ .

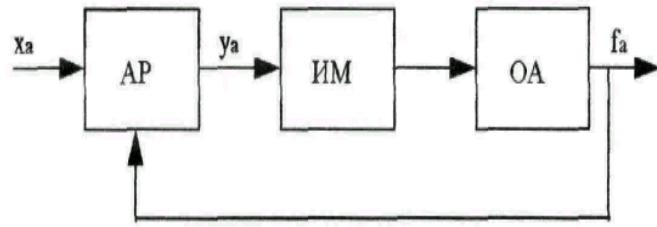


Рисунок 4.3 – Обобщённая структура замкнутой системы автоматического управления

Большими возможностями обладают цифровые регуляторы (ЦР), позволяющие реализовать закон управления в цифровой форме с помощью цифровых вычислительных средств. В этом случае в систему вводятся аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи (Рисунок 4.4). В цепь обратной связи включён цифровой датчик ЦД, выполняющий функции АЦП для регулируемой величины. На рисунке 4.4 индексы « $a$ » и « $ц$ » означают, что величина является аналоговой или цифровой соответственно.

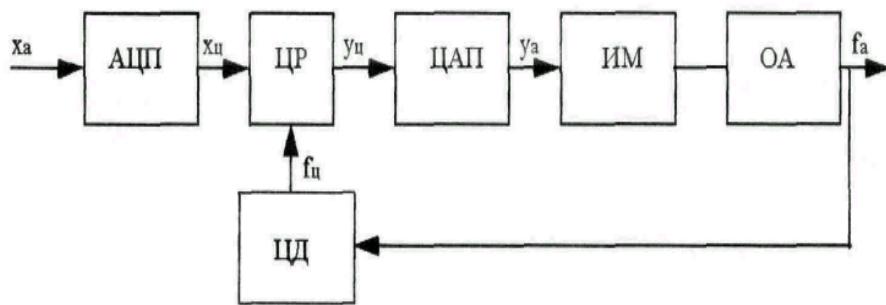


Рисунок 4.4 – Структура цифровой системы автоматического управления

Упрощённая типовая схема цифровой системы управления приведена на рисунке 4.5. На вход управляющего автомата (УА) поступают осведомительные сигналы (логические условия)  $x_l \in X = \{x_1, \dots, x_L\}$ , индицирующие состояния ОА. Логические условия  $x$  формируются специальными цифровыми датчиками ЦД1, ..., ЦДL. Управляющий автомат на

основе анализа сигналов  $x_1, \dots, x_L$  и закона управления, определяемого функцией  $F$ , формирует управляющие сигналы (микрооперации)  $y_n \in Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ , преобразуемые дискретными исполнительными механизмами  $\text{ДИМ}_1, \dots, \text{ДИМ}_N$  в сигналы управления ОА.

Возможны две принципиально различные структурные реализации УА: аппаратурная и программная. В первом случае алгоритм управления задаётся электрическими связями между функциональными элементами устройства, во втором - с помощью программы, хранимой в памяти системы.

Аппаратная реализация алгоритма управления возможна двумя путями – в виде автомата с «жёсткой» логикой (AHL – automaton with hardwired logic) или в виде автомата с «программируемой» логикой (APL – automaton with programmable logic).

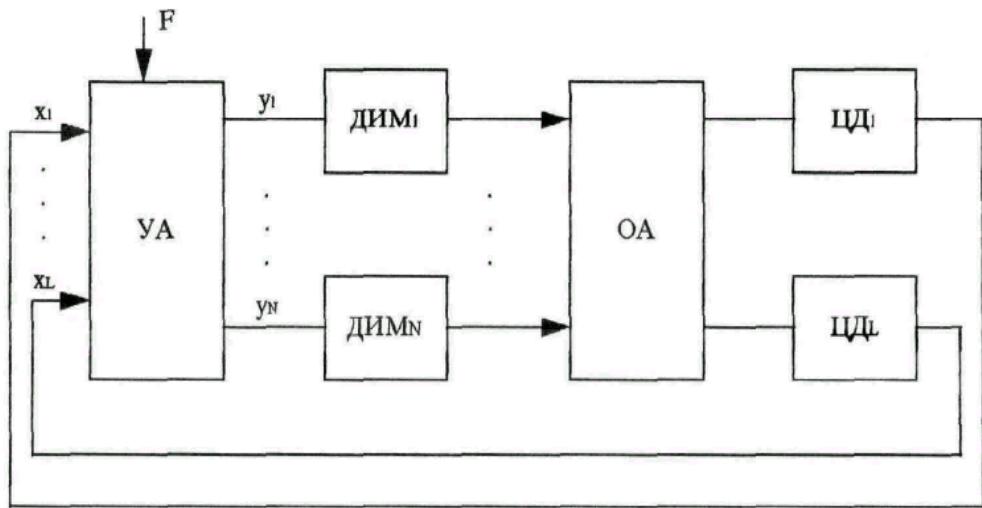


Рисунок 4.5 – Типовая структура цифровой системы программного управления

Для задания алгоритма управления используется большое количество различных языков – логические схемы алгоритма, матрицы переходов, система секвенций, граф-схемы алгоритма. Язык граф-схем алгоритма (ГСА) получил наиболее широкое применение в практике инженерного проектирования. Граф-схемы представляют собой совокупность начальной, конечной, условных и операторных вершин, подчиняющуюся правилам

детерминированности, конечности и результативности.

Автомат с «жёсткой» логикой является конечным цифровым автоматом и может быть синтезирован каноническим методом структурного синтеза. Структурная схема AHL включает (Рисунок 4.6), комбинационную схему КС, формирующую по сигналам  $x_l \in X$  и переменным обратной связи  $T_r \in T = \{T_1, \dots, T_R\}$  управляющие сигналы  $y_n \in Y$  и функции  $\varphi_r \in \Phi \{\varphi_1, \dots, \varphi_R\}$  возбуждения памяти автомата, представляющей собой регистр RG. Переменные  $T_r \in T$  используются для кодирования состояний автомата  $a_m \in A \{a_1, \dots, a_M\}$ .

Существует два типа AHL – автомат Мили и автомат Мура, отличающиеся видом функции выходов  $\lambda$ . В автомате Мили функции  $y_n \in Y$  определяется как  $Y = \lambda(X, T)$ , а в автомате Мура  $Y = \lambda(T)$ .

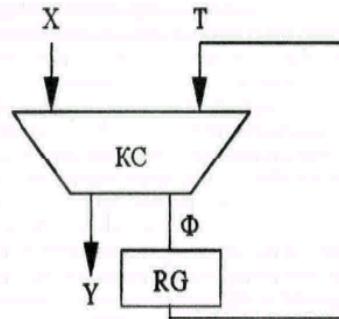


Рисунок 4.6 – Структурная схема AHL

Закон перехода из состояния в состояние задаётся функцией перехода  $\delta$ , которая одинакова для обоих автоматов.

Синтез автоматов по ГСА производится одинаковым образом и включает идентичные этапы, которые отличаются только содержанием:

а). Формирование отмеченной ГСА. На этом этапе для автомата Мура начальная и конечная вершины отмечаются отметкой  $a_1$ , а каждая операторная вершина отмечается одним из состояний  $a_1, \dots, a_M$ .

б). Кодирование состояний AHL. При этом каждому состоянию  $a_m \in A$  ставится в соответствие двоичный код  $C(a_m)$  разрядности  $R = \text{int}(\log_2 M)$ .

в). Формирование прямой структурной таблицы (ПСТ) AHL. Для автомата Мура ПСТ включает столбцы :

$a_m$  – исходное состояние;  $C(a_m)$  – код состояния  $a_m \in A$ ;  $a_s$  – состояние перехода;  $C(a_s)$  – код состояния  $a_s \in A$ ;  $X_h$  – входной сигнал, задающий переход из  $a_m$  в  $a_s$ ;  $\Phi_h$  – набор функций возбуждения, формируемых для переключения памяти из  $C(a_m)$  в  $C(a_s)$ ;  $h$  – номер перехода ( $h = 1, \dots, H$ ). Кроме того, в столбце  $a_m$  записывается выходной сигнал, формируемый AHL в этом состоянии.

г). Формирование системы уравнений AHL. На этом этапе по ПСТ формируется система уравнений

$$\varphi_r = \bigvee_{h=1}^H C_{rh} A_m X_h \quad (r = \overline{1, R}),$$

$$y_n = \bigvee_{m=1}^M C_{nm} A_m \quad (n = \overline{1, N}),$$

где  $C_{rh}$  ( $C_{nm}$ ) – булева переменная, равная единице, если в  $h$ -й строке ПСТ записан сигнал  $\varphi_r$ , (в состоянии  $a_m$  формируется сигнал  $y_n$ ),  $A_m$  – конъюнкция переменных  $T_r \in T$ , соответствующая коду  $C(a_m)$ .

д). Синтез схемы автоматов в заданном элементном базисе.

Таблица 4.1 является ПСТ автомата Мура, построенной по ГСА GO (Рисунок 4.7). Из таблицы 4.1 имеем, например,  $D_1 = A_3 \bar{x}_2 \vee A_4 \bar{x}_2 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{x}_2 \vee \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{x}_2 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{x}_2$ ,  $y_3 = A_3 \vee A_4 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \vee \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 = \bar{T}_1 \bar{T}_2$ . Здесь память AHL реализована на D-триггерах, которые широко используются для этих целей на практике.

Таблица 4.1 – Прямая структурная таблица AHL Мура

$a_m$	$C(a_m)$	$a_s$	$C(a_s)$	$X_h$	$\Phi_h$	$h$
$a_1$	000	$a_2$	001	1	D3	1
$a_2$ ( $y_1y_2$ )	001	$a_3$	010	$x_1$	D2	2
		$a_4$	011	$x_1$	D2D3	3
$a_3$ ( $y_2y_3$ )	010	$a_5$	100	$x_7$	D1	4
		$a_4$	011	$x_2$	D2D3	5
$a_4$ ( $y_3$ )	011	$a_5$	100	$x_T$	D1	6
		$a_4$	011	$x_2$	D2D3	7
$a_5$ ( $y_2y_4$ )	100	$a_1$	000	1	—	8

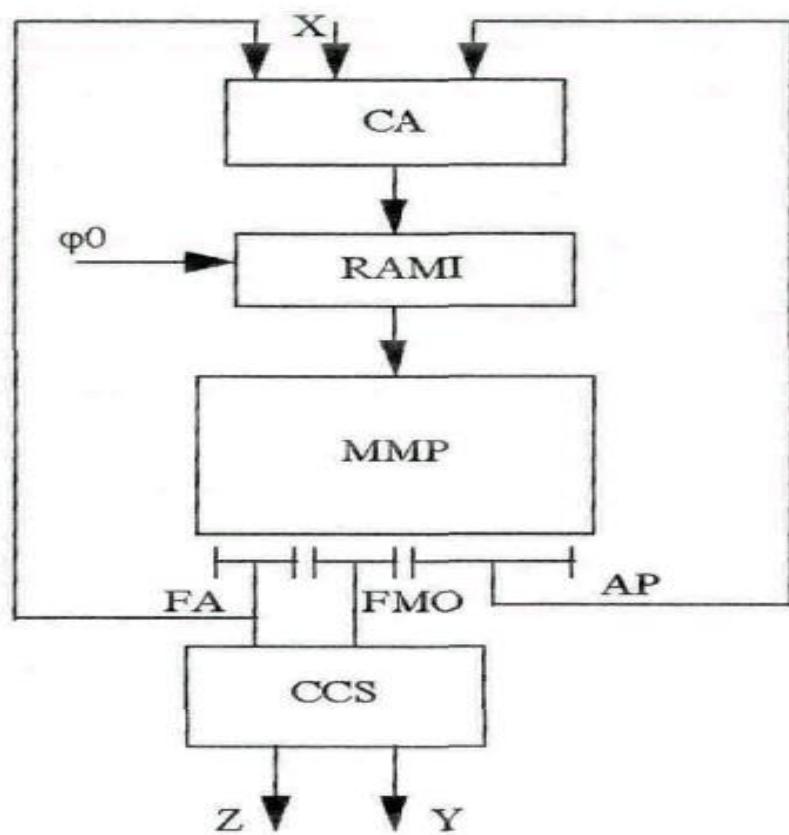


Рисунок 4.7 – Структурная схема автомата с «программируемой» логикой

## 4.3 Основные параметры элементов и способы их совершенствования

Существуют и другие методы реализации алгоритмов управления – логические процессоры, распределители импульсов, перестраиваемые автоматы, многофункциональные логические модули. Однако AHL и APL нашли наиболее широкое применение в системах цифровой автоматики и вычислительной техники. При этом, как правило, AHL используются для реализации быстродействующих систем, а APL – для реализации объёмного микропрограммного обеспечения в больших ЭВМ, мини- и микроЭВМ. Характерной особенностью APL является возможность оперативного изменения микропрограмм при использовании для реализации ММР оперативных запоминающих устройств. Это позволяет использовать принцип динамического микропрограммирования, адаптировать алгоритм управления к изменениям в операционном автомате. Автоматы с «жесткой» логикой не представляют такой возможности и схема имеет заказной характер, а смена алгоритма управления требует изменений в связи между элементами AHL.

Рассмотрим задачу совершенствования характеристик автомата с естественной адресацией микрокоманд.

### 4.3.1 Синтез автомата с преобразователем адреса микрокоманд

Один из недостатков автомата с естественной адресацией (EA) микрокоманд - наличие управляющих микрокоманд безусловного перехода, которые вводятся для ликвидации критических ситуаций по адресации. Поясним это на примере фрагмента ГСА G3 (Рисунок 4.8, а). Вершинам 1, 2 соответствуют операционные микрокоманды (ОМК), а вершинам 3, 4, 5 - управляющие. При этом адрес микрокоманды, соответствующей вершине 6, должен быть одновременно на единицу больше адресов микрокоманд, соответствующих вершинам 1- 4. Так как это невозможно, то в ГСА вводятся вершины 7 - 9, которым соответствуют микрокоманды безусловного перехода

к МК 6 (Рисунок 4.8,б). Это приводит к увеличению числа микрокоманд и, следовательно, ёмкости ММР, а также к увеличению времени выполнения алгоритма.

Для устранения этих недостатков предлагается метод введения преобразователя адреса микрокоманд (АСМ), который формирует сигналы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  для управления счётчиком адреса (Рисунок 4.9).

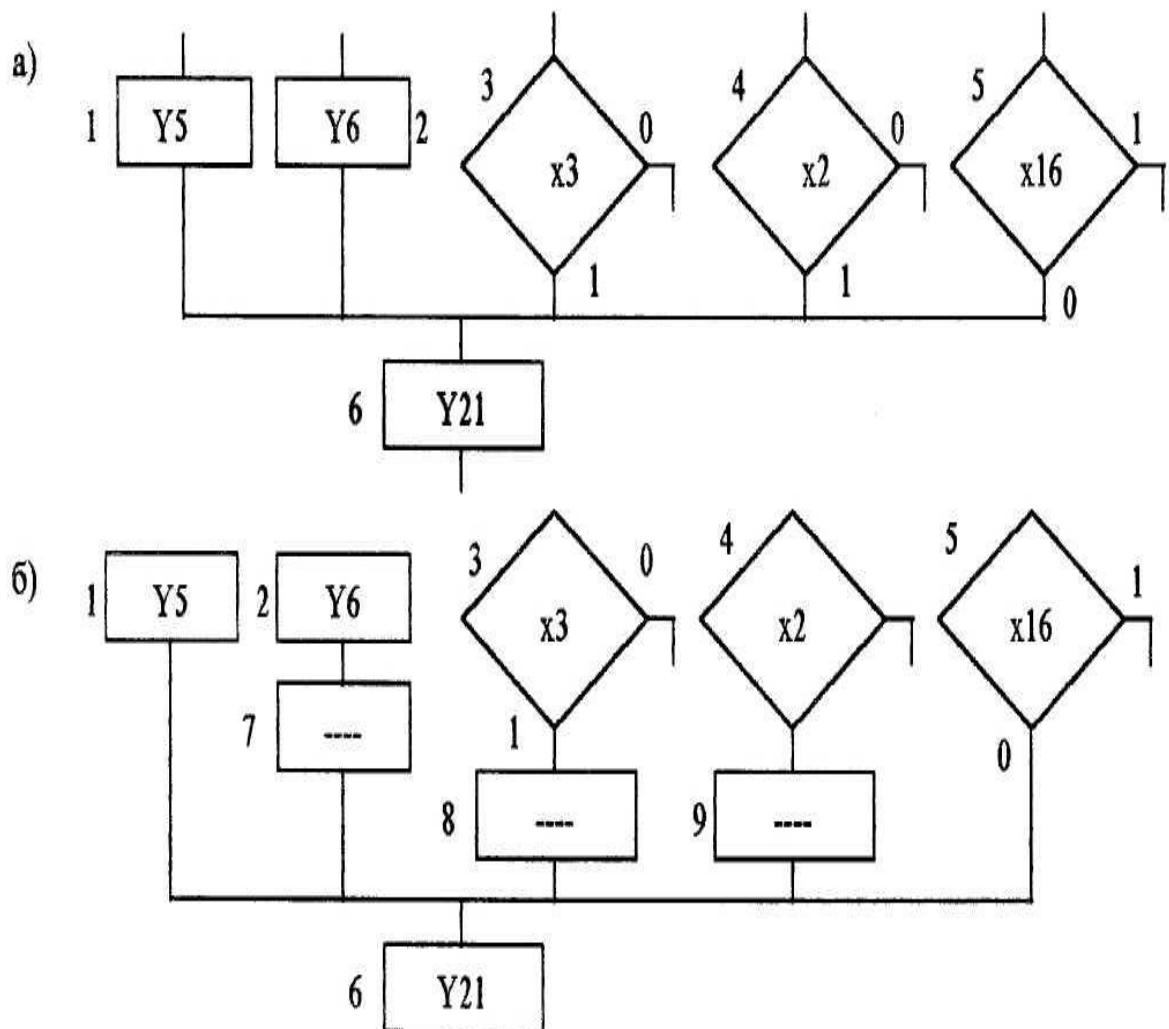


Рисунок 4.8 – Фрагмент ГСА G3 до (а) и после (б) преобразования

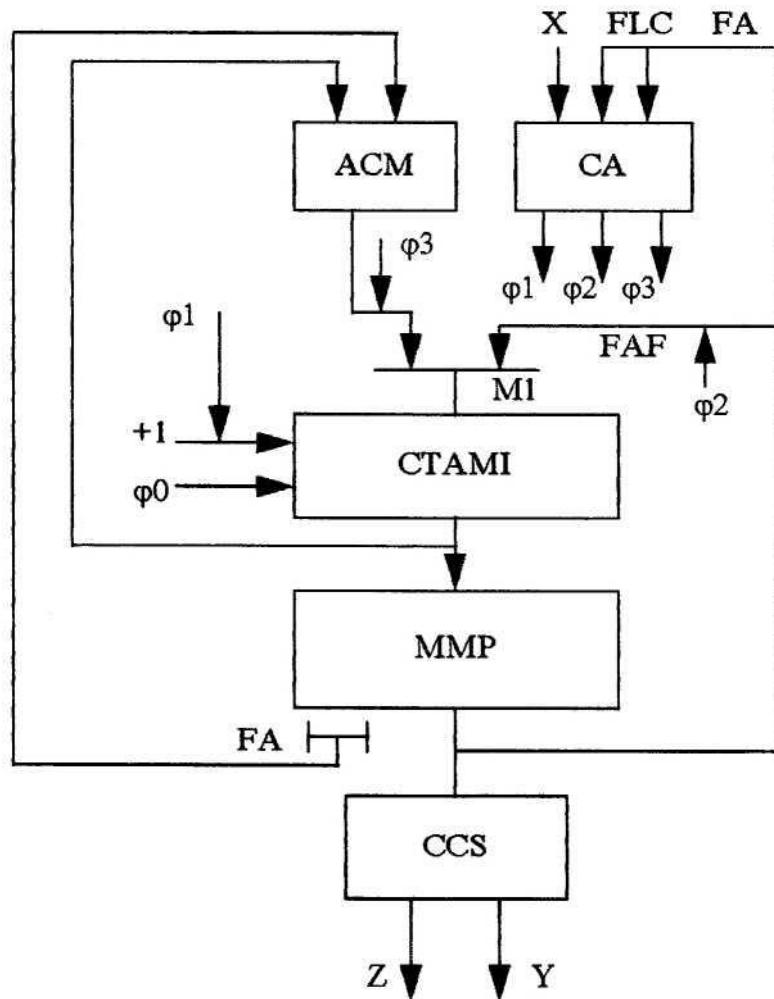


Рисунок 4.9 – Структурная схема автомата с преобразователем адреса микрокоманд

Схема функционирует следующим образом. После выборки очередной МК поле признака FA и поле кода логических условий FLC поступают в схему адресации, которая вырабатывает один из трёх управляющих сигналов:

- увеличение содержимого СТАМИ на единицу ( $\varphi_1$ ), при отсутствии критических ситуаций;
- передача в СТАМИ поля FAF микрокоманды ( $\varphi_2$ ), если проверяемое ЛУ равняется нулю;
- передача в СТАМИ адреса перехода, формируемого ACM по содержимому СТАМИ ( $\varphi_3$ ) при наличии критических ситуаций.

Таким образом, поле признака FA должно отметить три способа адресации:

а). 00 - безусловный переход после выполнения операционной микрокоманды с прибавлением единицы к СТАМ;

б). 01 - переход по преобразованному адресу после выполнения операционной микрокоманды;

в). 10 - условный переход, способ формирования адреса определяется сигналами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (нет конфликтных ситуаций после выполнения УМК);

г). 11 - условный переход, способ формирования адреса определяется сигналами  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  (в исходной ГСА были конфликтные ситуации для УМК).

Рассмотрим пример синтеза автомата с преобразователем адреса МК по ГСА G4 рисунок 4.10, для чего используем следующую методику:

а). Выделить ОМК и УМК, используя методику из работы [123], без ввода дополнительных УМК.

б). Выполнить адресацию микрокоманд, используя методику из [123, с.48], модифицированную с учётом особенностей адресации.

в). Сформировать содержимое MMP, используя двухразрядное поле FA.

г). Задать таблицу преобразователя адреса (ПСТ), входами которой является адрес текущей микрокоманды, а выходом - адрес перехода.

д). Построить схемы СА, ACM, MMP и CCS, используя методику из [124].

Согласно методике операторным вершинам соответствуют ОМК, а условным – УМК. Обозначим микрокоманды символами  $O_i$ , где  $i$ - индекс, совпадающий с индексом вершины. Для адресации микрокоманд построим последовательности микрокоманд, модифицировав методику – последовательность  $\alpha$ , завершается, если переход из очередной конечной МК осуществляется в МК, уже включённую в другие последовательности.

В нашем случае формируются последовательности  $\alpha_1(O_2, O_3, O_6, O_9, O_{10}, O_{13})$ ,  $\alpha_2 = \langle O_4 \rangle$ ,  $\alpha_3 = \langle O_5, O_8 \rangle$ ,  $\alpha_4 = \langle O_7 \rangle$ ,  $\alpha_5 = \langle O_{11} \rangle$ ,  $\alpha_6 = \langle O_{12} \rangle$ , адреса микрокоманд заданы картой Карно на рисунке 4.11. Разрядность адреса  $R_0 = \text{int}(\log_2 M_0) = \text{int}(\log_2 12) = 4$ , здесь  $M_0$  – число микрокоманд

автомата с АСМ.

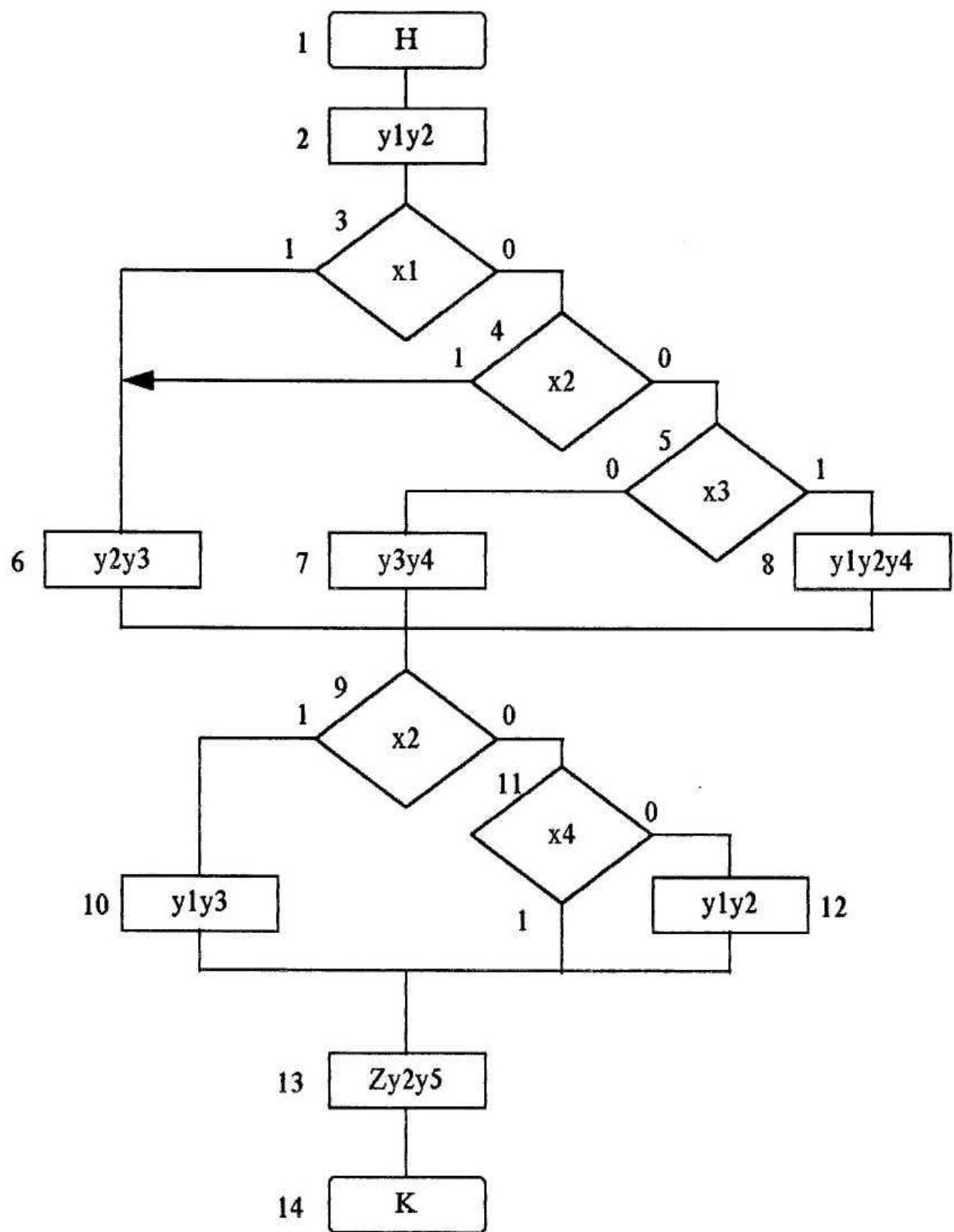


Рисунок 4.10 – Граф-схема алгоритма G4

		b3b4			
		00	01	11	10
b1b2	00	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>9</sub>	O <sub>6</sub>
	01	O <sub>10</sub>	O <sub>13</sub>	O <sub>8</sub>	O <sub>5</sub>
	11	*	*	*	*
	10	O <sub>4</sub>	O <sub>7</sub>	O <sub>11</sub>	O <sub>12</sub>

Рисунок 4.11 – Карта Карно для адресации микрокоманд автомата с ACM

Для формирования содержимого ММР закодируем микрооперации унитарными, а логические условия - максимальными кодами. В нашем случае разрядность поля FMOm=N=6, разрядность поля  $FLCl_0 = \text{int}(\log_2 L) = 2$ . Пусть  $C(x_1) = 00$ ,  $C(x_2) = 01$ ,  $C(x_3) = 10$ ,  $C(x_4) = 11$ . С учётом кодирования полей FA, FMO, FLCи FAFсодержимое ММР приведено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Содержимое ММР автомата с ACM

Адрес	FA	Zy1				№ МК
		FLC		FAF		
b1 b2 b3 b4	1 2	3 4	5	6	7 8	
0 0 0 0	0 0	0 1	1	0	0 0	O <sub>2</sub>
0 0 0 1	0 1	0 0	1	0	0 0	O <sub>3</sub>
0 0 1 0	0 0	0 0	1	1	0 0	O <sub>6</sub>
0 0 1 1	0 1	0 1	1	0	1 1	O <sub>9</sub>
0 1 0 0	0 1	0 1	0	1	0 0	O <sub>10</sub>
0 1 0 1	0 0	1 0	1	0	0 1	O <sub>13</sub>
0 1 1 0	0 1	1 0	1	0	0 1	O <sub>5</sub>
0 1 1 1	1 0	0 1	1	0	1 0	O <sub>8</sub>
1 0 0 0	1 1	0 1	0	1	1 0	O <sub>4</sub>
1 0 0 1	1 0	0 0	0	1	1 0	O <sub>7</sub>
1 0 1 0	1 0	0 1	1	0	0 0	O <sub>12</sub>
1 0 1 1	1 1	1 1	1	0	1 0	O <sub>11</sub>

При синтезе автомата традиционным методом его память содержит 17 микрокоманд разрядности

$$r = \max(l+m, l + l + R) = \max(1 + 6, 1 + 3+5) = 9.$$

Таким образом, требуемая ёмкость ММР для предлагаемого метода  $V_1=12*8=96$  (бит), а для традиционного –  $V_2=17*9=153$  (бит). Однако, при применении АСМ необходимо учесть и требуемую ёмкость ПЗУ для его реализации. В данном случае для реализации АСМ требуется  $V_3=5\cdot4=20$  (бит).

Таким образом, выигрыш от введения АСМ можно оценить отношением

$$\eta = (V_2/(V_1+V_3)). \quad (4.1)$$

Таблица 4.3 задаёт содержимое ПЗУ для АСМ, требуемого для реализации ГСА G4.

Как видно из анализа таблицы 4.3 предпочтительнее реализовать АСМ на ПЛМ или ПЛИС, однако при этом схема потеряет свою универсальность и станет схемой «жёсткой» логикой. Если же необходимо сохранить универсальность, то схема АСМ должна быть реализована на ПЗУ.

Таблица 4.3 – Содержимое ПЗУ АСМ

Адрес	Содержимое	№ МК
1 0 0 0	0 0 1 0	O <sub>4</sub>
1 0 0 1	0 0 1 1	O <sub>7</sub>
0 1 1 1	0 0 1 1	O <sub>8</sub>
1 0 1 1	0 1 0 1	O <sub>11</sub>
1 0 1 0	0 1 0 1	O <sub>12</sub>

Для уменьшения числа микросхем ПЗУ в АСМ предлагается следующая методика:

а). Множества микрокоманд  $O = \{O_1, \dots, O_m\}$  разбивается на два класса  $O^1$  и  $O^2$ . Класс  $O^1$  включает микрокоманды, адрес перехода для которых формируется схемой АСМ, класс  $O^2$  включает микрокоманды, адрес перехода для которых формируется схемой СА.

б). Микрокоманды  $O_m \in O^1$  располагаются по адресам, начиная с первого

до  $(M_1)_2 = (104)_2$ .

в). Микрокоманды  $O_m \in O^2$  адресуются, начиная с адреса  $(M_1+l)_2$  до  $(M_0)_2$ .

В этом случае разрядность адреса ПЗУ  $ACMR_A = \text{int}(\log_2 M_1)$ , однако начальной вершине необходимо поставить в соответствие микрокоманду безусловного перехода к первой микрокоманде микропрограммы и расположить её по адресу 00...0.

Рассмотрим применение этого метода при синтезе автомата с ACM по ГСА G4. В этом случае  $O = \{O_1, \dots, O_{13}\}$ , где  $O_1$  – микрокоманда, соответствующая начальной вершине множества  $O^1 = \{O_1, O_4, O_7, O_8, O_{11}, O_{12}\}$  и множество  $O^2 = \{O_2, O_3, O_6, O_9, O_{10}, O_{13}, O_5\}$ ,  $M_1=6$ ,  $R_1=3$ ,  $M_0=13, R_0=4$ . Адресация микрокоманд приведена в карте Карно на рисунке 4.12, содержимое MMP показано в таблице 4.4, а содержимое ACM – в таблице 4.5.

Таблица 4.4 – Содержимое MMP автомата с ACM

Адрес	F A	Z y 1 y 2 y 3 y 4 y 5					№ МК
		FLC		FAF			
b1 b2 b3 b4	1 2	3	4	5	6	7	8
0 0 0 0	1 0	0	0	1	0	0	0
0 0 0 1	1 1	0	1	0	1	0	1
0 0 1 0	1 1	1	1	0	1	0	0
0 0 1 1	1 0	0	0	0	1	1	0
0 1 0 0	1 0	0	1	1	0	0	0
0 1 0 1	1 1	1	0	0	0	1	1
0 1 1 0	1 0	0	1	1	0	1	0
0 1 1 1	**	*	**	*	*	*	*
1 0 0 0	0 0	0	1	1	0	0	0
1 0 0 1	0 1	0	0	0	0	0	1
1 0 1 0	0 0	0	0	1	1	0	0
1 0 1 1	0 1	0	1	0	0	1	0
1 1 0 0	0 0	0	1	0	1	0	0
1 1 0 1	0 0	1	0	1	0	0	1
1 1 1 0	**	*	**	*	*	*	*
1 1 1 1	**	*	*	*	*	*	*

		b3b4	00	01	11	10	
		b1b2	00	O <sub>1</sub>	O <sub>4</sub>	O <sub>7</sub>	O <sub>11</sub>
		b1b2	01	O <sub>12</sub>	O <sub>5</sub>	*	O <sub>8</sub>
		b1b2	11	O <sub>10</sub>	O <sub>13</sub>	*	*
		b1b2	10	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>9</sub>	O <sub>6</sub>

Рисунок 4.12 – Адресация микрокоманд автомата с АСМ

Таблица 4.5 - Содержимое АСМ

Адрес	Содержимое	№ М К
b2 b3 b4	b1 b2 b3 b4	
0 0 0	1 0 0 0	O <sub>1</sub>
0 0 1	1 0 1 0	O <sub>4</sub>
0 1 0	1 1 0 1	O <sub>11</sub>
0 1 1	1 0 1 1	O <sub>7</sub>
1 0 0	1 1 0 1	O <sub>12</sub>
1 0 1	* * * *	*
1 1 0	1 0 1 1	O <sub>8</sub>
1 1 1	* * * *	*

Для оценки выигрыша  $\eta$  от введения АСМ необходимо преобразовать компоненты выражения (4.1) с учётом параметров ПЗУ  $q$  и  $t$ :

$$\begin{aligned}
 V_2 &= \text{int}((l + \text{int}(\log_2(L + 1)) + R)/t) * \text{int}(M/q); \\
 V_1 &= \text{int}((2 + \text{int}(\log_2 L) + R_0)/t) * \text{int}(M_0/q); \\
 V_3 &= \text{int}(R_0/t) * \text{int}(M_1/q).
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Для оценки параметров  $L$ ,  $R$ ,  $M$ ,  $R_0$ ,  $M_0$ ,  $M_1$  воспользуемся результатами работы [49, с.215], которые позволяют выразить число микрокоманд автомата с ЕА как функцию от числа вершин  $K$  и вероятностей  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  и  $\chi_3$ :

$$M = (\chi_1 + \chi_2 + \chi_3)K, \tag{4.3}$$

где  $\chi_1$  – доля операторных вершин ГСА,  $\chi_2$  – доля условных вершин ГСА,  $\chi_3$  – вероятность появления микрокоманд безусловного перехода при наличии конфликтных ситуаций по адресации. Как и ранее  $\chi_1 \in [0.47; 0.69]$ , а  $\chi_3$  находится в интервале  $[0.2; 0.5]$ . Условимся, что число ЛУ совпадает с числом условных вершин. Очевидно, что  $M_1 = \chi_3 \cdot K$ ,  $M_0 = K$ , остальные составляющие выражений (4.3) достаточно просто выражаются как функции

$\chi_1, \chi_2, \chi_3, K, t$  и  $q$ :

$$\begin{aligned}
 V_1 &= k_1 k_2; V_2 = k_3 k_4 V_3 = k_5 k_6; \\
 k_1 &= \text{int}((2 + \text{int}(\log_2 \chi_2 k) + \text{int}(\log_2 k))/t); \\
 k_2 &= \text{int}(k/q); \\
 k_3 &= \text{int}((1 + \text{int}(\log_2 (\chi_2 k + 1)) + \text{int}(\log_2 (\chi_1 + \chi_2 + \chi_3) k))/t); \\
 k_4 &= \text{int}((\chi_1 + \chi_2 + \chi_3) k/q); \\
 k_5 &= \text{int}(\text{int}(\log_2 K)/t); \\
 k_6 &= \text{int}(\chi_3 k/q).
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

С учётом выражений (4.5) выигрыш  $\eta$  от введения ACM представляется выражением (4.6):

$$\eta = (k_3 k_4) / (k_1 k_2 + k_5 k_6). \tag{4.6}$$

Результаты исследований приведены на рисунках 4.13 - 4.16. Как видно из графиков функции  $\eta$  выигрыш от введения ACM возможен при определённом сочетании характеристик алгоритма ( $K, \chi_1, \chi_2, \chi_3$ ) и элементного базиса ( $t, q$ ).

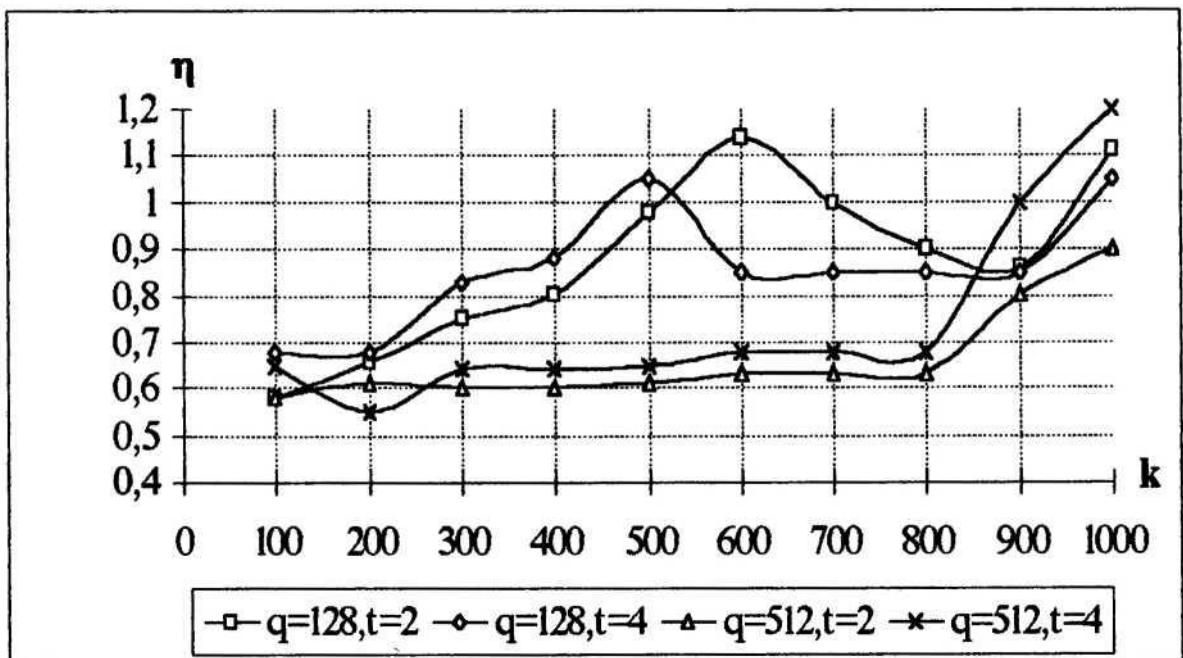


Рисунок 4.13 – Зависимость  $\eta$  ( $q, t$ ) при  $\chi_1=0.47, \chi_3=0.2$

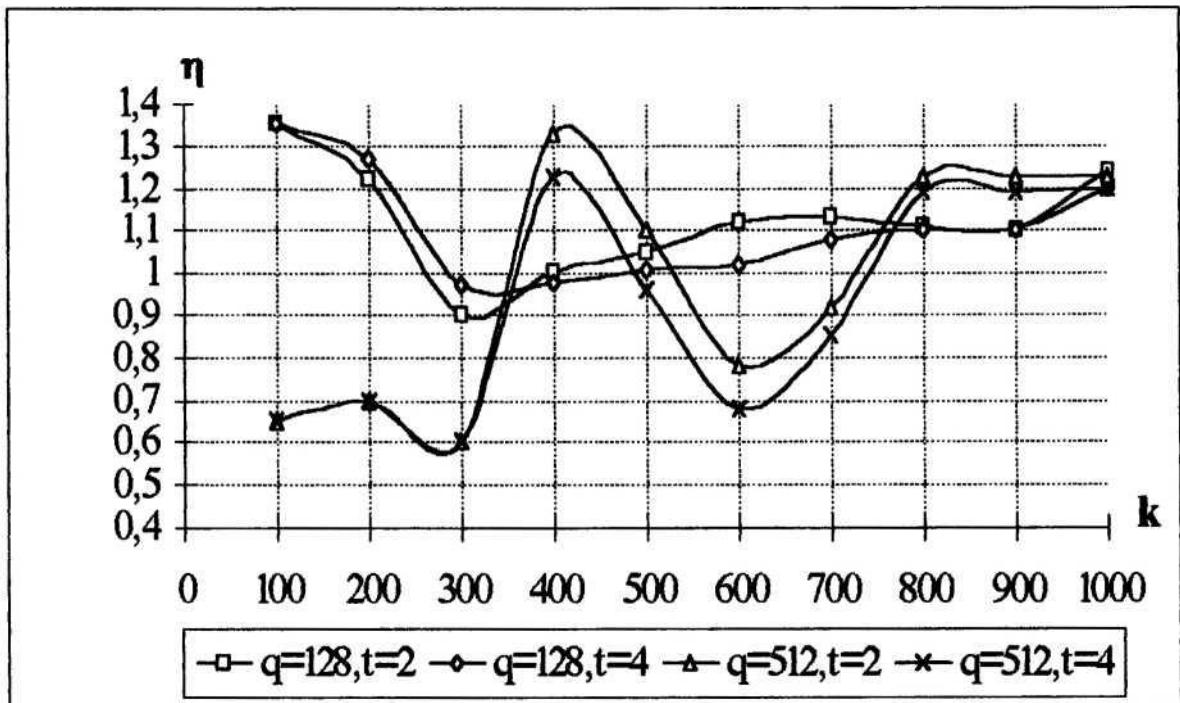


Рисунок 4.14 – Зависимость  $\eta$  (q,t) при  $\chi_1=0.47$ ,  $\chi_3=0.5$

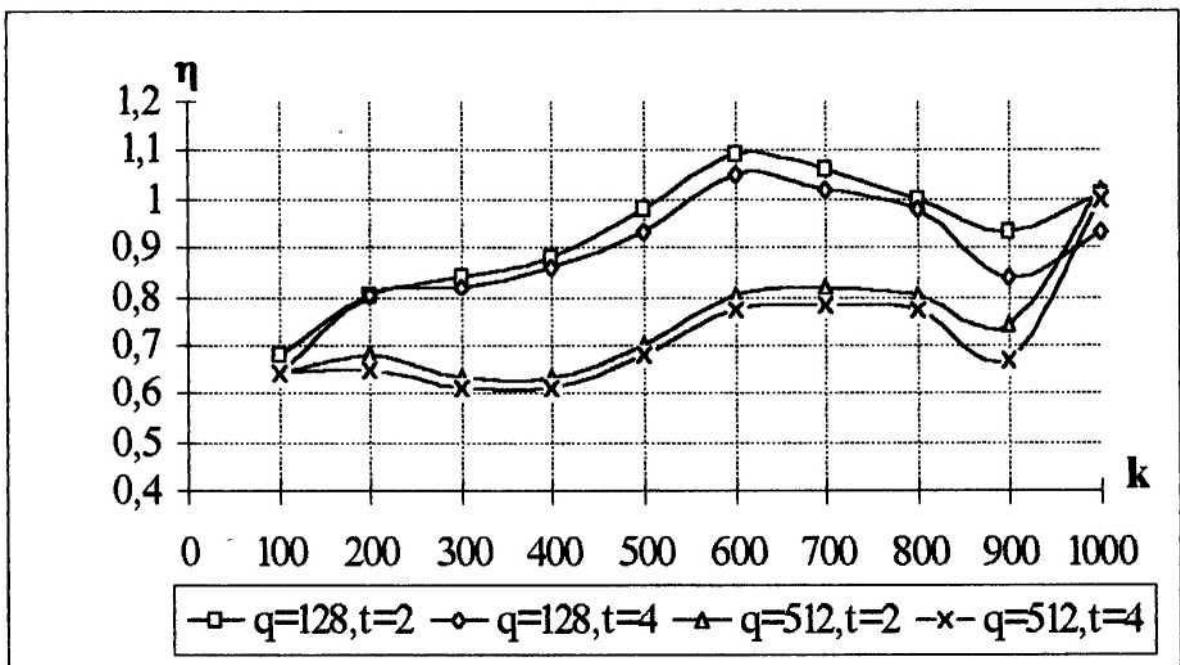


Рисунок 4.15 – Зависимость  $\eta$  (q,t) при  $\chi_1=0.69$ ,  $\chi_3=0.2$

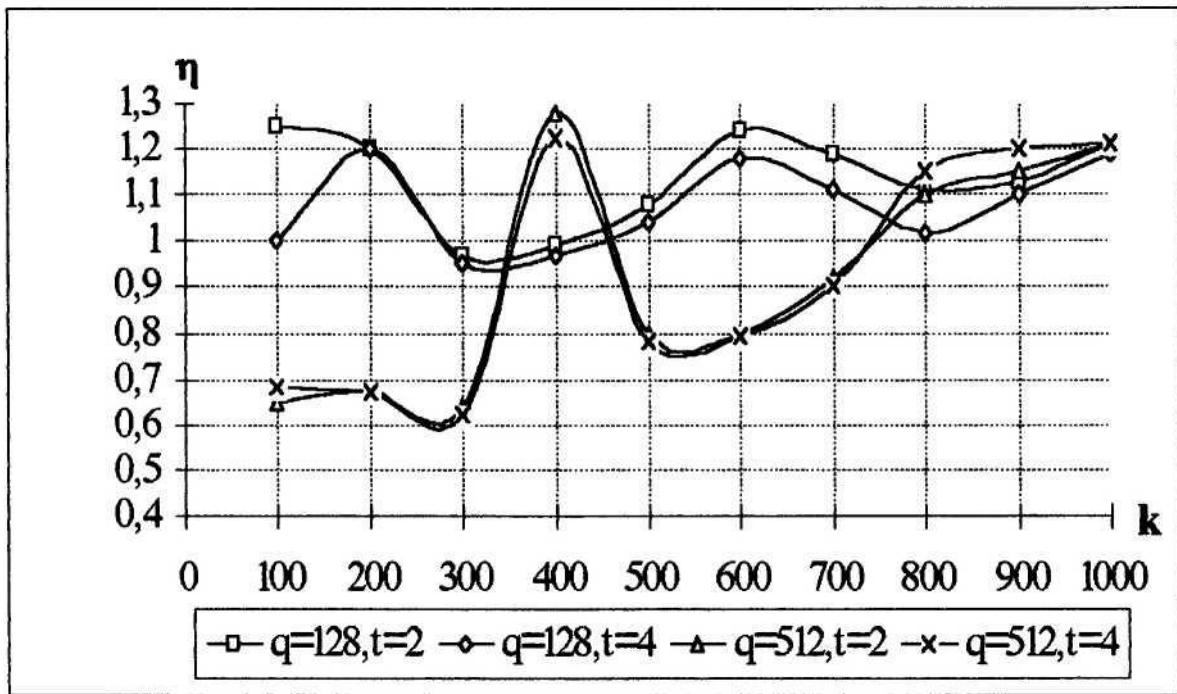


Рисунок 4.16 – Зависимость  $\eta$  (q,t) при  $\chi_1=0.69$ ,  $\chi_3=0.5$

Максимальный выигрыш достигает 1.32, при этом вероятность того, что  $\eta > 1$  повышается по мере роста числа вершин ГСА и числа микрокоманд безусловного перехода. Изменение сочетания числа операторных ( $\chi_1$ ) и условных ( $\chi_2$ ) вершин практически не влияет на параметр  $\eta$ .

#### 4.3.2 Синтез автомата с дополнительной схемой адресации

При использовании дополнительной схемы адресации СА1 формат микрокоманд автомата принимает вид (Рисунок 4.17, а), причём поле FA становится двухразрядным:

- FA= 00 – выполняется ОМК, адрес следующей МК формируется путём прибавления единицы к СТАМ;
- FA= 01 – выполняется ОМК, адрес следующей МК формируется схемой СА1;
- FA= 10 – выполняется УМК, адрес следующей МК формируется схемой СА;

- FA=11 - выполняется УМК безусловного перехода.

При этом структурная схема автомата имеет вид (Рисунок 4.17, б).

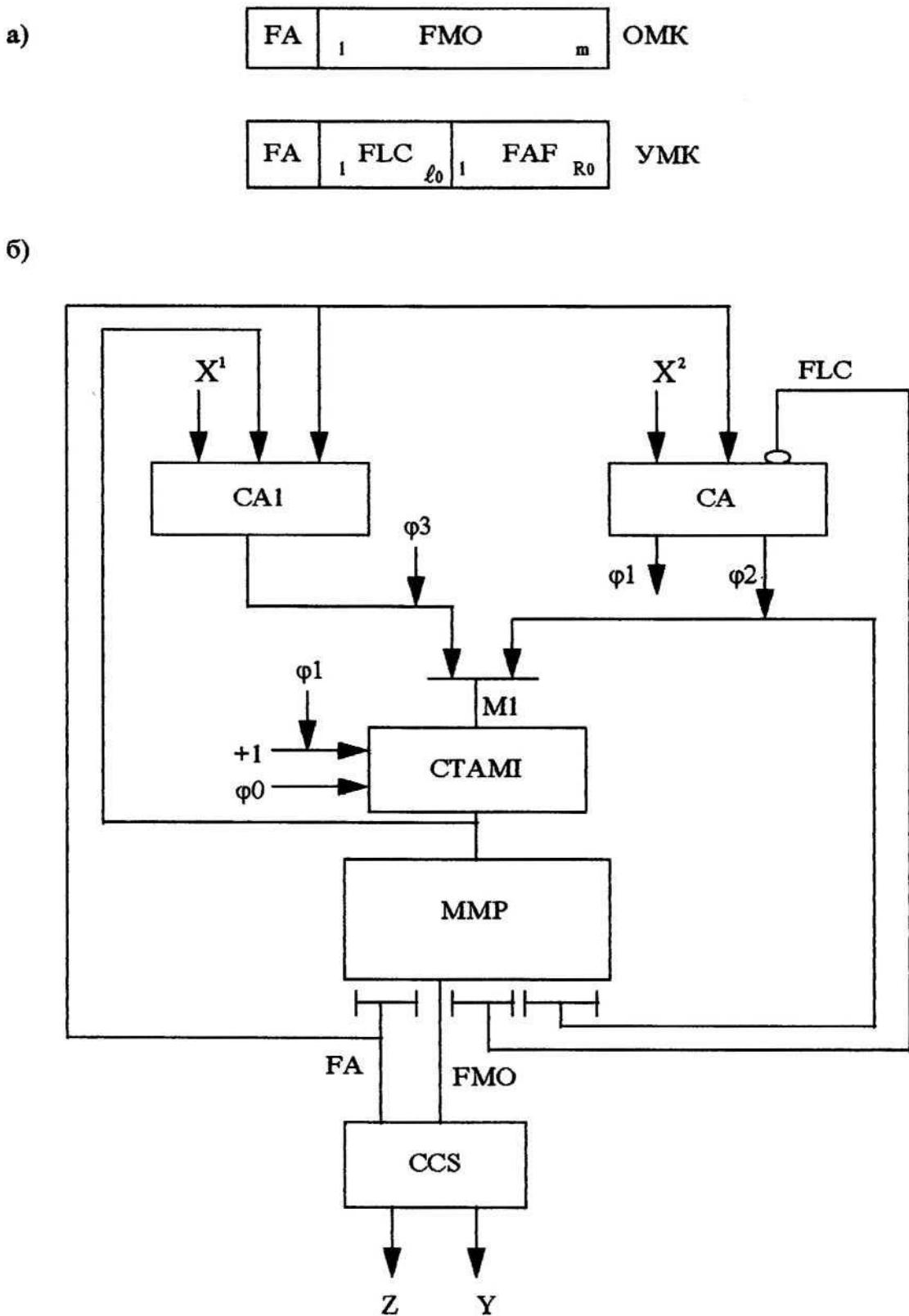


Рисунок 4.17 – Формат микрокоманды (а) и структурная схема (б) автомата с естественной адресацией и дополнительной схемой адресации микрокоманд

Здесь схема СА1 анализирует адрес текущей МК и значение конъюнкций логических условий из множества  $X^1$ , схема СА формирует управляющие сигналы  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , формирующие в СТАМПадрес перехода на основе анализа кода FLCи значения ЛУ  $x_l \in X^2 (l_0 = \text{int}(\log_2|X^2|))$ .

Алгоритм синтеза автомата по ГСА включает следующие этапы:

а). Формирование микрокоманд заданного формата, при этом, если после операторной вершины следует несколько условных вершин, то они объединяются в одну микрокоманду  $a_i \in O^1$ . Если после операторной вершины следует одна условная вершина, то каждой из вершин ставится в соответствие микрокоманда, включаемая во множество  $O^2$ .

б). Формирование дополнительных микрокоманд безусловного перехода для ликвидации конфликтных ситуаций по адресации для микрокоманд  $a_i \in O^2$ .

в). Адресация микрокоманд, при этом в отличие от [124, с.134] последовательности микрокоманд завершаются либо микрокомандой  $a_i \in O^1$ , либо микрокомандой, соответствующей операторной вершине, связанной с конечной, либо микрокомандой безусловного перехода.

г). Формирование прямой структурной таблицы автомата, в которой микрокоманды  $a_i \in O^1 = O^1 \cup O^2$  соответствуют состояниям автомата Мура. Таблица разбивается на две части:  $\Pi_j$  задаёт переходы из микрокоманд  $a_i \in O_j$  ( $j = \overline{1,2}$ ).

д). Формирование содержимого ММР по ПСТ.

е). Формирование схемы СА1 по П1.

ж). Формирование схемы СА по П2.

з). Синтез схемы автомата в заданном элементном базисе.

Применение первых двух пунктов методики к ГСА G4 приводит к формированию преобразованной ГСА G4 (Рисунок 4.18), в которой  $O^1 = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ ,  $O^2 = \{a_5, a_6, a_7, a_8\}$ . Отметим, что ЛУ  $x_2, x_4$  из вершин 9 и 11 ГСА G4 включены в три микрокоманды  $a_2, a_3, a_4$ . Для ликвидации конфликта между

микрокомандами  $a_5$  и  $a_6$ , введена микрокоманда  $a_8$  безусловного перехода к  $a_7$ . Применение п.(в) приводит к формированию последовательностей  $a_1, \dots, a_6$ ,  $a_1 = \langle a_1 \rangle, a_2 = \langle a_2 \rangle, a_3 = \langle a_3 \rangle, a_4 = \langle a_4 \rangle, a_5 = \langle a_5, a_7 \rangle, a_6 = \langle a_6, a_8 \rangle$ .

Микрокоманда  $a_0$  адресуется только в том случае, если после неё следует несколько условных вершин. Для адресации микрокоманд достаточно  $R_0 = \text{int}(\log_2 M_0)$  разрядов СТАМП, в данном случае  $M_0=8$  и  $R_0=3$ . Адресация микрокоманд показана картой Карно на рисунке 4.19.

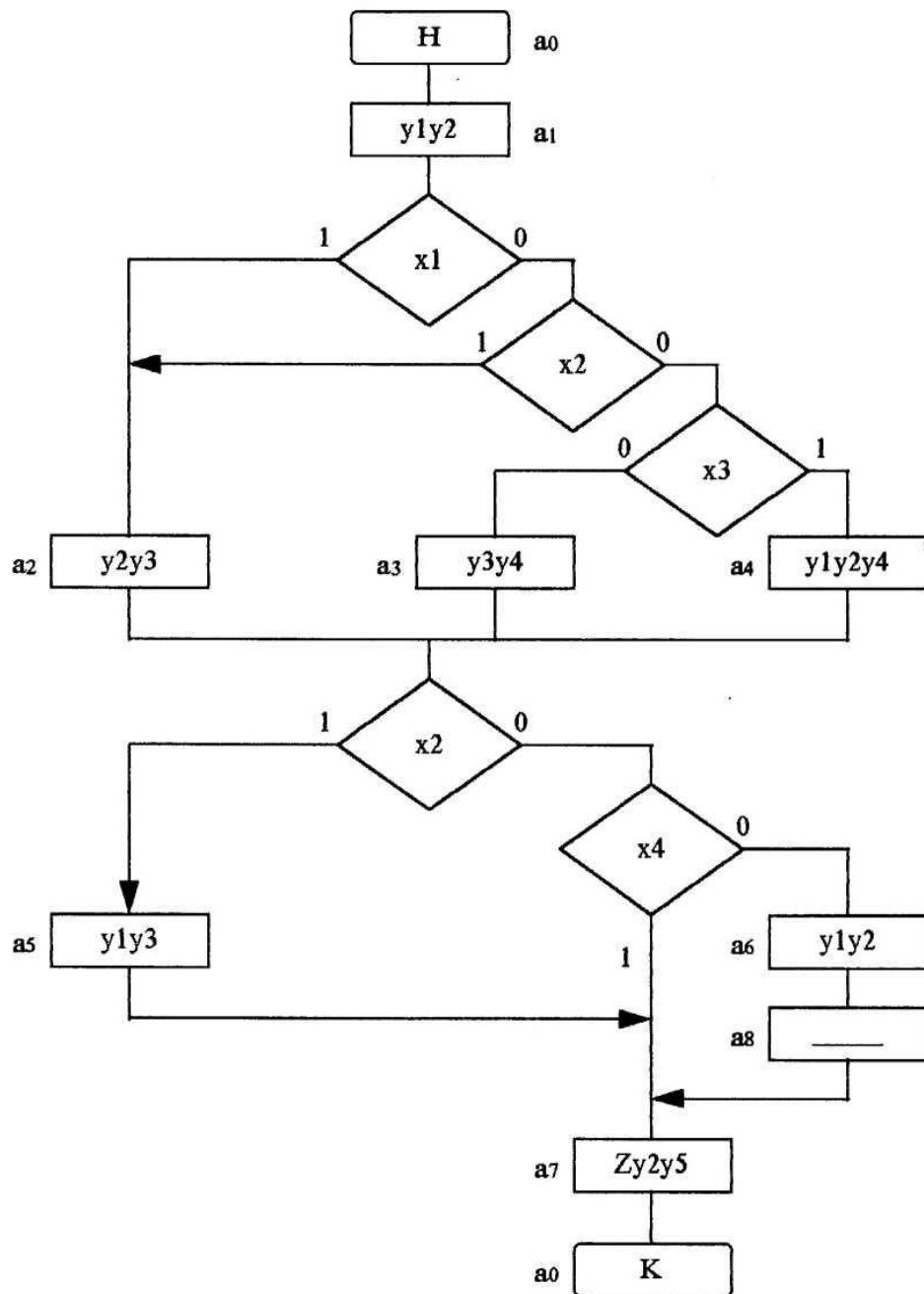


Рисунок 4.18 – Преобразованная ГСА G4

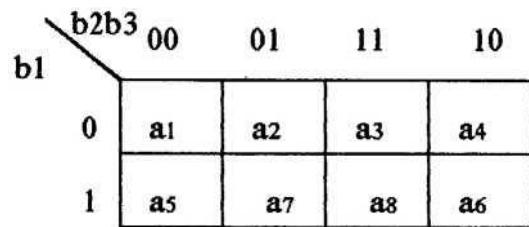


Рисунок 4.19 – Адресация микрокоманд

Прямая структурная таблица автомата (таблица 4.6) включает 17 строк, при этом  $X^1 = X$ ,  $X^2 = 0$ .

Таблица 4.6 – Прямая структурная таблица автомата с естественной адресацией микрокоманд

$a_m$	$C(a_m)$	$a_s$	$C(a_s)$	$X_h$	h	$\Pi_i$
$a_1$ ( $y_1y_2$ )	0 0 0	$a_2$	001	$X1$	1	$\Pi_1$
		$a_2$	001	$\overline{X1} X2$	2	
		$a_3$	011	$\overline{X1}X2\overline{X3}$	3	
		$a_4$	010	$\overline{X1}X2 X3$	4	
$a_2$ ( $y_2y_3$ )	0 0 1	$a_5$	100	$X2$	5	$\Pi_1$
		$a_7$	101	$\overline{X2}X4$	6	
		$a_6$	110	$\overline{X2}X4X4X4Me$	7	
$a_3$ ( $y_3y_4$ )	0 1 1	$a_5$	100	$X2$	8	$\Pi_1$
		$a_7$	101	$\overline{X2}X4$	9	
		$a_6$	110	$\overline{X2}X4$	10	
$a_4$ ( $y_1y_2y_4$ )	0 1 0	$a_5$	100	$X2$	11	$\Pi_1$
		$a_7$	101	$\overline{X2}X4$	12	
		$a_6$	110	$\overline{X2}X4$	13	
$a_5$ ( $y_1y_3$ )	1 0 0	$a_7$	101	1	14	$\Pi_2$
$a_6$ ( $y_1y_2$ )	1 1 0	$a_8$	111	1	15	
$a_7$ ( $Zy_2y_5$ )	1 0 1	$a_0$	–	–	16	
$a_8$ (–)	1 1 1	$a_7$	101	1	17	

Формирование содержимого ММР происходит с следующим порядком:

- микрокомандам  $a_m \in O^1$  соответствует ОМК, поле FA=01, поле FMO определяется кодом набора микроопераций из столбца  $a_m$ ;
- микрокомандам  $a_m \in O^2$  при безусловном переходе соответствует ОМК, поле FA=00, поле FMO определяется кодом набора микроопераций из столбца  $a_m$ ;
- микрокомандам  $a_m \in O^2$  условного перехода соответствует УМК, FA=10, поле FLC определяется кодом ЛУ  $x_l \in X^2$ , поле FAF определяется столбцом C( $a_s$ ) при  $x_l = 0$ ;
- микрокомандам  $a_m \in O^2$ , соответствующим дополнительным операторным вершинам, ставится в соответствие УМК, FA=11, поле FLC – нулевое, поле FAF содержит адрес безусловного перехода.

Для нашего случая имеются наборы микроопераций  $Y_1 = \{y_1, y_2\}$ ,  $Y_2 = \{y_2, y_3\}$ ,  $Y_3 = \{y_3, y_4\}$ ,  $Y_4 = \{y_1, y_2, y_4\}$ ,  $Y_5 = \{y_1, y_3\}$ ,  $Y_6 = \{y_1, y_2\}$ ,  $Y_7 = \{Z, y_2, y_5\}$ , которые можно закодировать кодами разрядности  $m = \text{int}(\log_2 T)$ , где  $T$  - число наборов [125].

В данном примере  $T = 7$  и  $m = 3$ , пусть  $C(Y_1) = 001, \dots, C(Y_7) = 111$ . Множество  $X^2$  пусто, поэтому поле FLC будет отсутствовать. Разрядность ММР  $r = \max(2+m, 2+l_0+R_0)$ , в нашем случае  $r = \max(2+3, 2+0+3) = 5$ . Содержимое ММР приведено в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Содержимое ММР автомата с СА1

Адрес	FA	FMO FAF	№ МК
b1 b2 b3	1 2	3 4 5	
0 0 0	0 1	0 0 1	$a_1$
0 0 1	0 1	0 1 0	$a_2$
0 1 0	0 1	0 1 1	$a_3$
0 1 1	0 1	1 0 0	$a_4$
1 0 0	0 0	1 0 1	$a_5$
1 0 1	0 0	1 1 1	$a_7$
1 1 0	0 0	1 1 0	$a_6$
1 1 1	1 1	1 0 1	$a_8$

Формирование содержимого схемы СА1 осуществляется тривиальным образом. На рисунке 4.20 показано содержимое ПЛМ, реализующей СА1, при этом использована нотация из работы [126].

В качестве сигнала  $\phi_3$  можно использовать конъюнкцию  $\overline{FA[0]} \cdot FA[1]$ , которая подаётся на вход выборки кристалла ПЛМ. Отметим, что аппаратурные затраты в схеме СА1 можно уменьшить за счёт использования законов склеивания. Из ПСТ видно, что переходы из состояний  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  идентичны. Если кодам  $C(a_2)$  и  $C(a_3)$  поставить в соответствие их дизъюнкцию  $0*1$ , то содержимое ПЛМСА1 будет иметь следующий вид (Рисунок 4.21).

Этапы (ж) и (з) рассматриваемой методики выполняются тривиально [123, с.40]. Отметим, что введение ПЛМ позволяет повысить быстродействие автомата, но делает схему заказной.

Исследуем предложенный метод с точки зрения экономии аппаратуры, так как повышение быстродействия для разветвлённых микропрограмм является несомненным фактом. Очевидно, что выигрыш  $\eta$  по сравнению с традиционным способом адресации определяется выражением (4.1), где  $V_3$  – количество микросхем ПЛМ в схеме СА1. Исследуем параметр  $\eta$  ориентируясь на стандартные ПЛМ K556PI1 [127], у которых число входов  $S_{\Pi}=16$ , число выходов  $t_{\Pi}=8$ , число реализуемых слов  $q_{\Pi}=48$ . В этом случае при  $K \leq 1000$ , количество ПЛМ в схеме СА1 может быть оценено выражением

$$V_3 = k_5 k_6 k_7,$$

где  $k_5 = \text{int}(L_1/(S_{\Pi} - R_0))$ ,  $k_6 = \text{int}(M_1/q_{\Pi})$ ,  $k_7 = \text{int}(R_0/t_{\Pi})$ . Как правило использование алгоритмов распределения системы булевых функций по ПЛМ [128, 129] позволяет уменьшить  $V_3$  в два раза. Кроме того при  $K \leq 1000$   $R_0 \approx 10$  и влиянием коэффициента  $k_1$  можно пренебречь.

Окончательно имеем

$$V_3 = \text{int}(L_1/2(S_{\Pi} - R)) \cdot \text{int}(M_1/q_{\Pi}) \approx k_5 k_6,$$

$$\text{где } L_1 = |X^1|.$$

Выразим  $V_1 = k_1 k_2$  и  $V_2 = k_3 k_4$  через параметры ГСА –  $k, \chi_1, \chi_2, \chi_3$  и ПЗУ- $t, q$ .

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \text{int}((2 + \text{int}(\log_2 \chi_2 \chi_4 k) + \text{int}(\log_2 \chi_5 k))/t); \\
 k_2 &= \text{int}(\chi_5 k/q); \\
 k_3 &= \text{int}((1 + \text{int}(\log_2 (\chi_2 k + L)) + \text{int}(\log_2 (1 + \chi_3) k))/t); \\
 k_4 &= \text{int}(\text{int}(\log_2 K)/t);
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Здесь  $\chi_4$  – доля логических условий, реализуемых схемой СА, тогда  $L_1 = (1 - \chi_4)\chi_2 k$  – доля ЛУ, реализуемых схемой СА1;  $\chi_5$  – доля микрокоманд по отношению к числу вершин, пусть  $\chi_5 = 0.1 + \chi_1$ .

Входы							Термы	Выходы		
x1	x2	x3	x4	T1	T2	T3		b1	b2	b3
1	*	*	*	0	0	0	1	0	0	1
0	1	*	*	0	0	0	2	0	0	1
0	0	0	*	0	0	0	3	0	1	1
0	0	1	*	0	0	0	4	0	1	0
*	1	*	*	0	0	1	5	1	0	0
*	0	*	1	0	0	1	6	1	0	1
*	0	*	0	0	0	1	7	1	1	0
*	1	*	*	0	1	1	8	1	0	0
*	0	*	1	0	1	1	9	1	0	1
*	0	*	0	0	1	1	10	1	1	0
*	1	*	*	0	1	0	11	1	0	0
*	0	*	1	0	1	0	12	1	0	1
*	0	*	0	0	1	0	13	1	1	0

Рисунок 4.20 – Содержимое ПЛМ схемы СА1

Входы							Термы	Выходы		
x1	x2	x3	x4	T1	T2	T3		b1	b2	b3
1	*	*	*	0	0	0	1	0	0	1
0	1	*	*	0	0	0	2	0	0	1
0	0	0	*	0	0	0	3	0	1	1
0	0	1	*	0	0	0	4	0	1	0
*	1	*	*	0	*	1	5,8	1	0	0
*	0	*	1	0	*	1	6,9	1	0	1
*	0	*	0	0	*	1	7,10	1	1	0
*	1	*	*	0	1	0	11	1	0	0
*	0	*	1	0	1	0	12	1	0	1
*	0	*	0	0	1	0	13	1	1	0

Рисунок 4.21 – Содержимое ПЛМ схемы СА1 с учётом законов склеивания

Теперь имеем

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \text{int}((2+\text{int}(\log_2 \chi_2 \chi_4 k) + \text{int}(\log_2 (0.1 + \chi_1) k))/t); \\
 k_2 &= \text{int}((0.1 + \chi_1) k/q); \\
 k_5 &= \text{int}((1 - \chi_4) \chi_2 k / 2(S_n - \text{int}(\log_2 (0.1 + \chi_1) k))); \\
 k_6 &= \text{int}((\chi_2 + \chi_3) k/q_n).
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Графики зависимости  $\eta = \eta(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, K, t, q)$  при  $S_n=16$ ,  $q_n=48$  приведены на рисунках 4.22 - 4.23. Из анализа этих зависимостей можно сделать следующие выводы:

- выигрыш  $\eta$  увеличивается по мере уменьшения числа выходов и слов ПЗУ;
- в большинстве случаев традиционная схема автомата требует меньше аппаратурных затрат, чем схема с дополнительной схемой адресации;
- выигрыш  $\eta$  уменьшается по мере роста числа логических условий, реализуемых СА1.

При изменении параметра  $\chi_1$  зависимости практически не меняются, так как уменьшение числа ПЗУ в ММР сопровождается ростом числа ПЛМ в схеме СА1.

Предпочтительнее для реализации СА1 использовать ПЛИС, число реализуемых слов в которых значительно превышает соответствующие характеристики ПЛМ [129, с.200]. Параметры  $k_5$  и  $k_6$  существенно зависят от входов и слов ПЛМ.

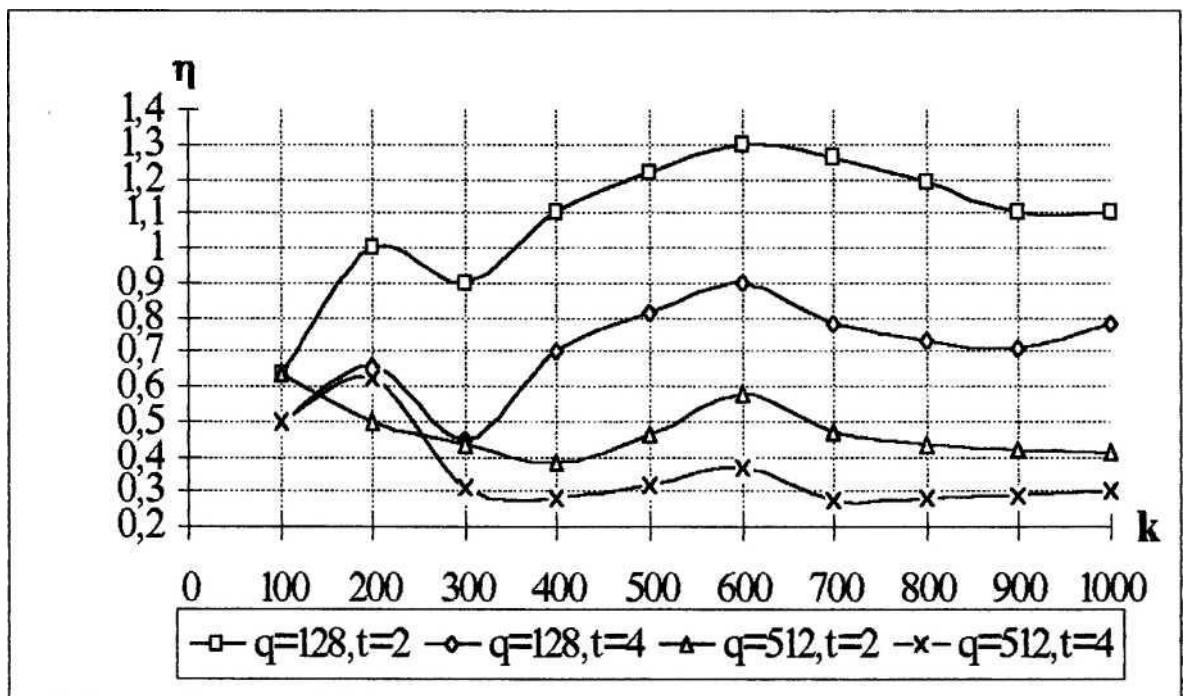


Рисунок 4.22 – Зависимость  $\eta$  (q,t) при  $\chi_1=0.47$ ,  $\chi_3=0.2$ ,  $\chi_4=0.5$

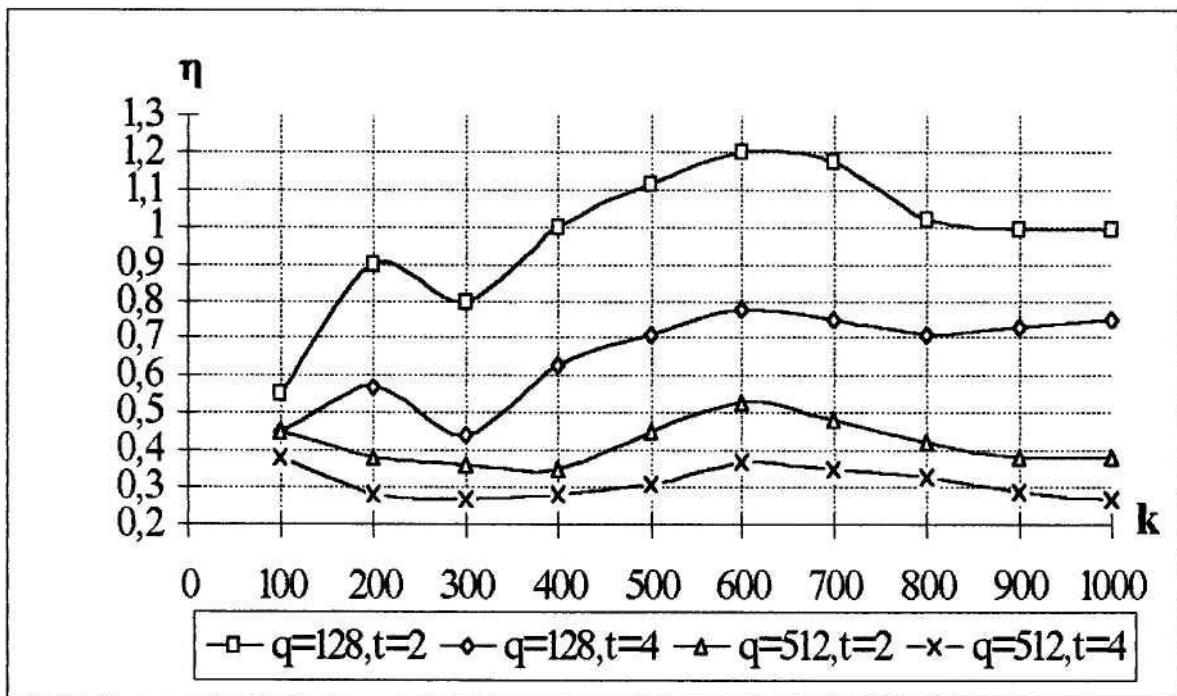


Рисунок 4.23 – Зависимость  $\eta$  ( $q, t$ ) при  $\chi_1=0.47$ ,  $\chi_3=0.2$ ,  $\chi_4=0.2$

### 4.3.3 Синтез автомата с дополнительной схемой адресации и преобразователем адреса микрокоманд

Объединение методов, рассмотренных в п.п. 4.3.1-4.3.2 позволяет получить схему автомата с максимальным быстродействием. В автомате с дополнительной схемой адресации и преобразователем адреса МК:

- переход из любой операторной вершины осуществляется за один такт;
- отсутствуют управляющие микрокоманды безусловного перехода.

Возможны две структуры автомата – с раздельными схемами СА1 и АСМи с совмещенными схемами СА1 и АСМ.

Структура автомата с раздельными схемами СА1 и АСМ приведена на рисунке 4.24. Для правильного функционирования автомата поле FA должно задавать следующие типы переходов:

- выполняется ОМК, адрес перехода формируется схемой СА ( $FA=000$ );
- выполняется ОМК, адрес перехода формируется схемой СА1 ( $FA=001$ );

- выполняется ОМК, адрес перехода формируется схемой АСМ ( $FA=010$ );
- выполняется УМК, адрес перехода формируется схемой СА ( $FA=011$ );
- выполняется УМК, адрес перехода формируется схемой СА и АСМ ( $FA=100$ ).

Для синтеза схемы автомата предлагается следующая методика:

а). Формирование микрокоманд заданного формата по ГСА. Если после операторной вершины следует несколько условных вершин, то они объединяются в одну микрокоманду  $O_i \in O^1$ . Если после операторной вершины следует только одна условная вершина, то каждой из вершин соответствует микрокоманда, включаемая в множество  $O^2$ .

б). Формирование последовательностей микрокоманд, при этом в отличие от [123] последовательность завершается либо МК  $O_i \in O^1$ , либо МК, соответствующей операторной вершине, связанной с конечной, либо МК, которая приводит к конфликту. Микрокоманды, приводящие к конфликтным ситуациям, образуют множество  $O^3$ , при этом они исключаются из  $O^2$ .

- в). Адресация микрокоманд.
- г). Формирование ПСТ автомата, которая разбивается на три части П1-П3, соответствующие множествам  $O^1 - O^3$ .
- д). Формирование содержимого ММР по ПСТ.
- е). Формирование содержимого СА1 по П1.
- ж). Формирование содержимого СА по П2.
- з). Формирование содержимого АСМ по П3.
- и). Синтез схемы автомата в заданном элементном базисе.

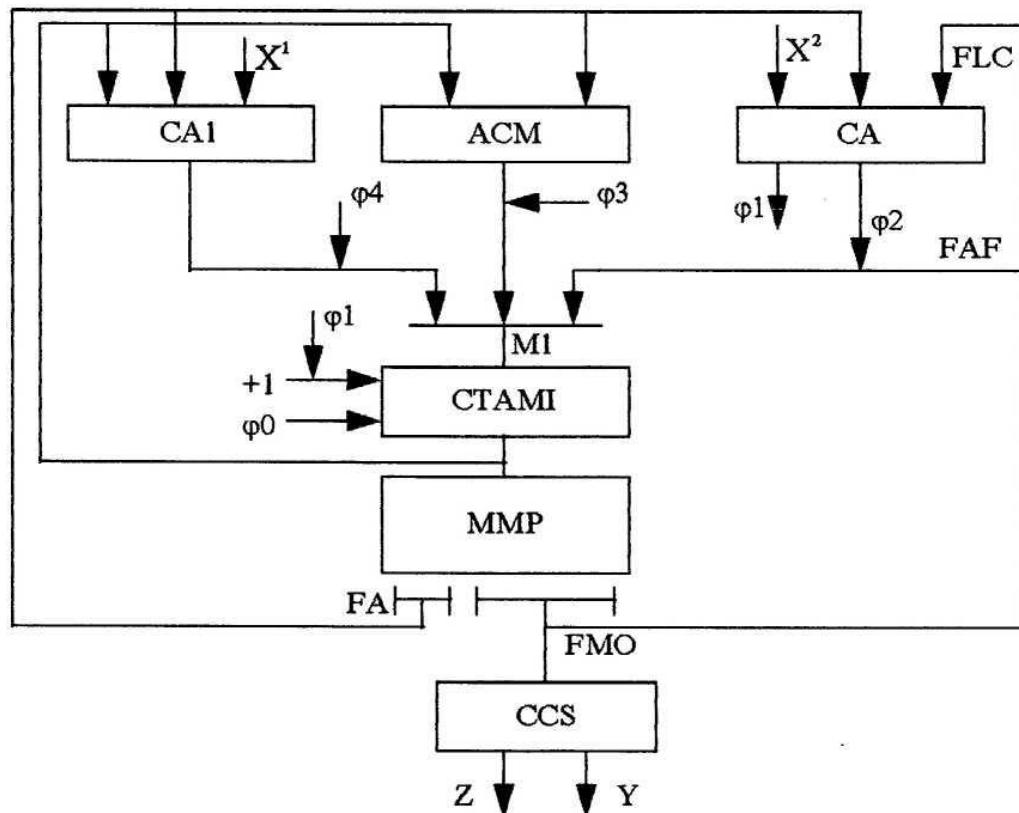


Рисунок 4.24 – Структурная схема автомата с раздельными схемами  $CA1$  и  $ACM$

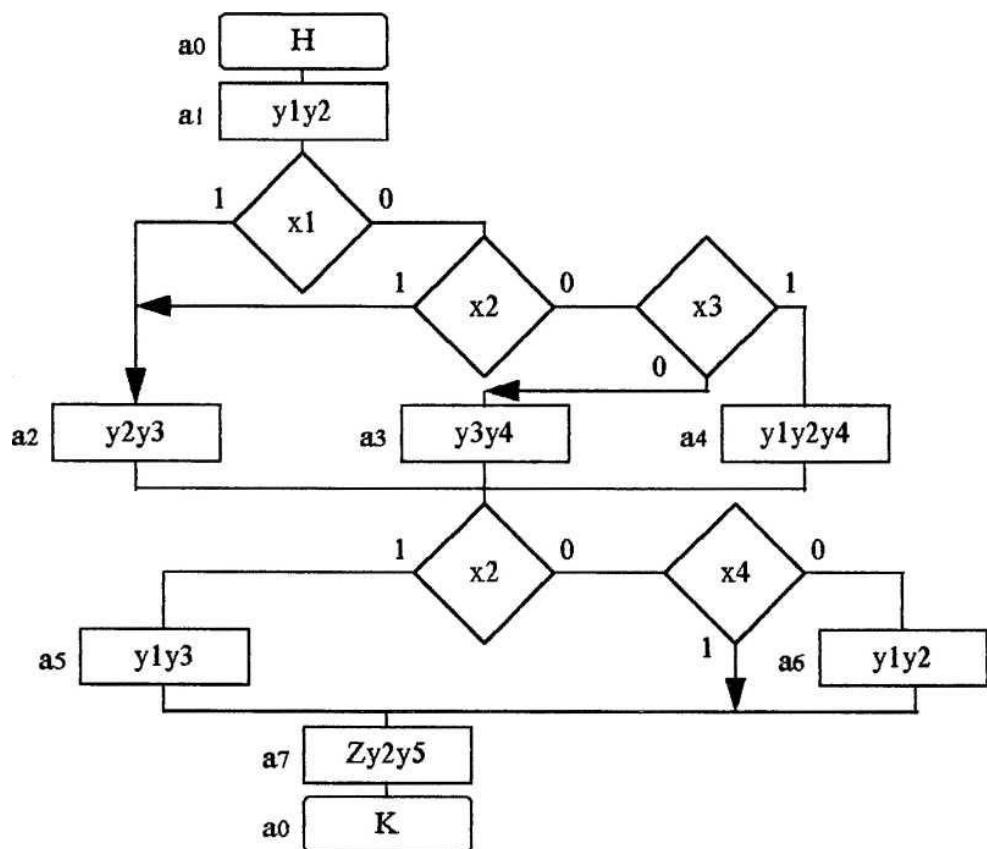


Рисунок 4.25 – Отмеченная ГСА  $G4$

Применение первого пункта этой методики к ГСА G4 приводит к формированию отмеченной ГСА (Рисунок 4.25) и множеств  $O^1 = \{a_1, \dots, a_4\}$  и  $O^2 = \{a_5, a_6, a_7\}$ . После формирование последовательностей  $a_1 = \langle a_1 \rangle$ ,  $a_2 = \langle a_2 \rangle$ ,  $a_3 = \langle a_3 \rangle$ ,  $a_4 = \langle a_4 \rangle$ ,  $a_5 = \langle a_5, a_7 \rangle$ ,  $a_6 = \langle a_6 \rangle$  уточняются множества  $O^2 = \{a_5, a_7\}$  и  $O^3 = \{a_6\}$ . Адресация микрокоманд показана в карте Карно (Рисунок 4.26), а ПСТ приведена в таблице 4.8. Адресация выполнена с учётом минимизации схем СА1 и АСМ.

		b2b3	00	01	11	10
		b1	0	1	1	0
0	0	a1	a6	a3	a2	
	1	a5	a7	*	a4	

Рисунок 4.26 – Адресация микрокоманд

Формирование ММР происходит аналогично тому, как это делалось в п. 4.3.2, единственной особенностью является отличие кодов в поле FA, учитывающих особенности структуры. В нашем случае отсутствуют ситуации, соответствующие кодам 011 и 100. Поэтому для идентификации оставшихся трёх ситуаций достаточно двухразрядного поля FA. Условимся первую ситуацию отмечать кодом 00, вторую - 01 и третью - 10. С учётом этого содержимое ММР показано в таблице 4.9, кодирование наборов МО соответствует принятому в п. 4.3.2.

Содержимое ПЛМ схемы СА1 показано на рисунке 4.27, при этом микрокомандам  $a_2-a_4$  соответствует обобщённый адрес  $C(a_2, a_3, a_4) = *1*$ , что получается по карте Карно (Рисунок 4.26) с учётом неопределённости 111.

Содержимое АСМ для данного случая отражается в таблице 4.10.

Недостатком рассмотренной структуры является увеличение разрядности поля FA, этого недостатка лишен автомат с совмещением схем

АСМ и СА1 (Рисунок 4.28).

Таблица 4.8 – ПСТ автомата с раздельными схемами АСМ и СА1

$m$	$C(a_m)$	$a_s$	$C(a_s)$	$X_h$	$h$	$\Pi_i$
$a_1$ ( $y_1y_2$ )	0 0 0	$a_2$	001	$X1$	1	$\Pi_1$
		$a_2$	001	$\overline{X1} X2$	2	
		$a_3$	011	$\overline{X1} \overline{X2} \overline{X3}$	3	
		$a_4$	010	$\overline{X1} \overline{X2} X3$	4	
$a_2$ ( $y_2y_3$ )	0 1 0	$a_5$	100	$X2$	5	$\Pi_1$
		$a_7$	101	$\overline{X2} X4$	6	
		$a_6$	001	$\overline{X2} \overline{X4} X4 X4 Me$	7	
$a_3$ ( $y_3y_4$ )	0 1 1	$a_5$	100	$X2$	8	
		$a_7$	101	$\overline{X2} X4$	9	
		$a_6$	001	$\overline{X2} \overline{X4}$	10	
$a_4$ ( $y_1y_2y_4$ )	0 1 0	$a_5$	100	$X2$	11	
		$a_7$	101	$\overline{X2} X4$	12	
		$a_6$	001	$\overline{X2} \overline{X4}$	13	
$a_5$ ( $y_1y_3$ )	1 0 0	$a_7$	101	1	14	$\Pi_2$
$a_7$ ( $Zy_2y_5$ )	1 0 1	$a_0$	–	1	15	
$a_6$ ( $y_1y_2$ )	1 1 0	$a_8$	111	1	16	

Таблица 4.9 – Содержимое MMP автомата с раздельными схемами АСМ и СА1

А д р е с	F A	F M O	№ М К
		F A F	
b 1 b 2 b 3	1 2	3 4 5	
0 0 0	0 1	0 0 1	$a_1$
0 0 1	1 0	1 1 0	$a_6$
0 1 0	0 1	0 1 0	$a_2$
0 1 1	0 1	0 1 1	$a_3$
1 0 0	0 0	1 0 1	$a_5$
1 0 1	0 0	1 1 1	$a_7$
1 1 0	0 1	1 0 0	$a_4$
1 1 1	* *	* * *	*

Таблица 4.10 – Содержимое ПЗУ АСМ

Адрес	Выходы	№ МК
b3	b1 b2 b3	
0	* * *	*
1	1 0 1	$a_6$

Входы							Термы	Выходы		
x1	x2	x3	x4	T1	T2	T3		b1	b2	b3
1	*	*	*	0	0	0	1	0	1	0
0	1	*	*	0	0	0	2	0	1	0
0	0	0	*	0	0	0	3	0	1	1
0	0	1	*	0	0	0	4	1	1	0
*	1	*	*	*	1	*	5,8,11	1	0	0
*	0	*	1	*	1	*	6,9,12	1	0	1
*	0	*	0	*	1	*	7,10,13	0	0	1

Рисунок 4.27 – Содержимое ПЛМ схемы СА1

В этой структуре схема МАС осуществляет адресацию для микрокоманд  $O_i \in O^1 \cup O^3$ , а схема СА – для  $O_i \in O^2$ . Методика синтеза автомата полностью совпадает с ранее рассмотренной, однако таблицы П1 и П3 используются для формирования МАС. Поле FA должно иметь два разряда, что соответствует ситуациям:

- выполняется ОМК  $O_i \in O^1 \cup O^3 (FA=00)$ ;
- выполняется ОМК  $O_i \in O^2 (FA=01)$ ;
- выполняется УМК  $O_i \in O^2 (FA=10)$ .

Рассмотрим пример синтеза автомата по отмеченной ГСА G4 (Рисунок 4.25).

В таблице 4.11 показано содержимое ММР с учётом ранее выполненной адресации (Рисунок 4.26) и кодирования наборов микроопераций, при этом основной является ПСТ из таблицы 4.8.

Как видно из анализа таблицы 4.11 первый разряд FA равен нулю для всех микрокоманд и может быть исключен. Таким образом, для реализации ММР автомата с МАС требуется на один разряд меньше, чем в автомате с раздельными схемами АСМ и СА1.

Содержимое ПЛМ схемы МАС показано на рисунке 4.29.

Исследуем возможный выигрыш  $\eta$  по числу корпусов БИС для автомата с MAC по отношению к традиционному автомату с EA

$$\eta = (k_3 k_4) / (k_1 k_2 + k_5 k_6)$$

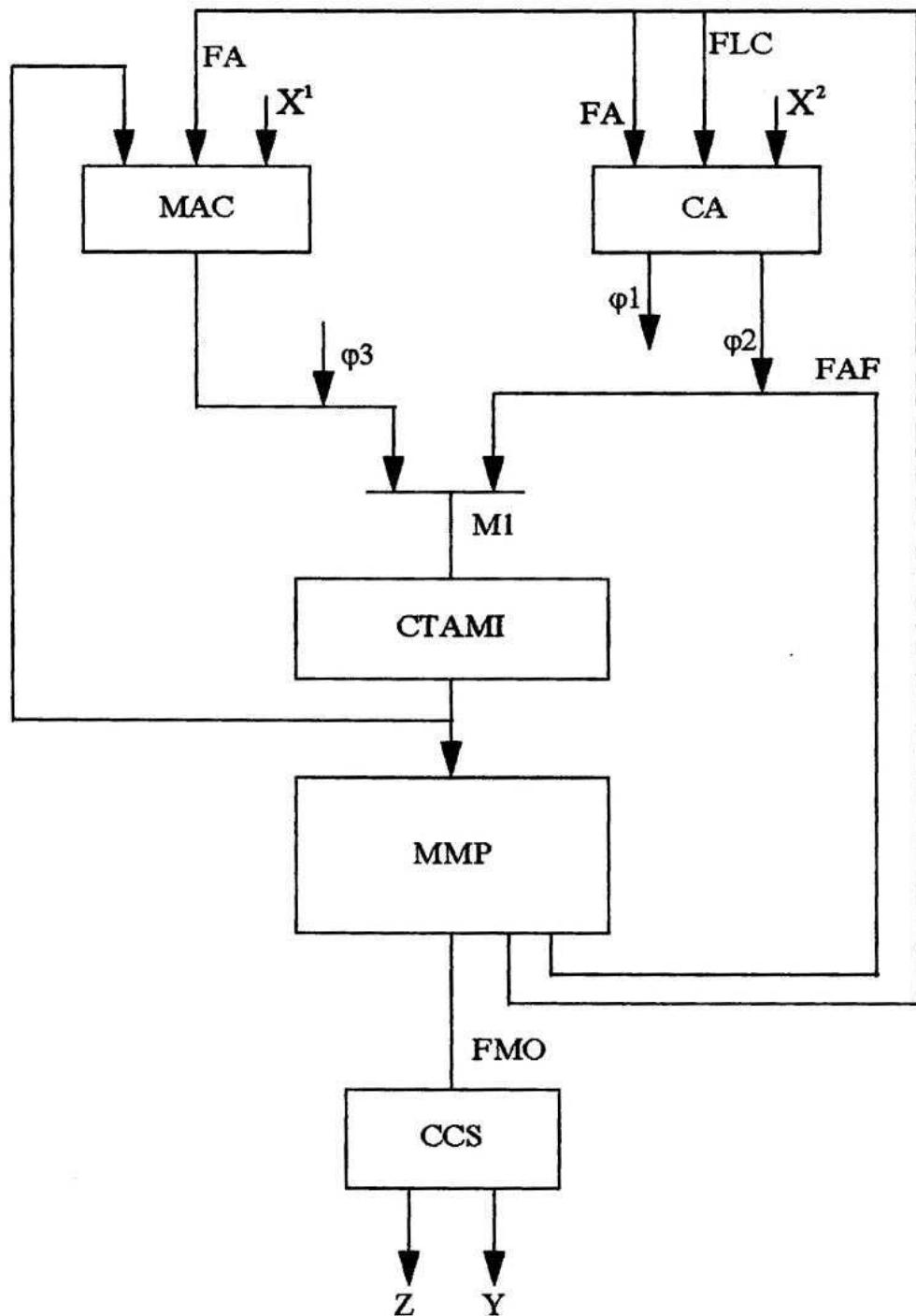


Рисунок 4.28 – Структурная схема автомата с совмещением функций ACM и CA1

Таблица 4.11 – Содержимое ММР автомата с МАС

Адрес	F A	FMO	№ М К
		FAF	
b1 b2 b3	1 2	3 4 5	
0 0 0	0 0	0 0 1	$a_1$
0 0 1	0 0	1 1 0	$a_6$
0 1 0	0 0	0 1 0	$a_2$
0 1 1	0 0	0 1 1	$a_3$
1 0 0	0 1	1 0 1	$a_5$
1 0 1	0 1	1 1 1	$a_7$
1 1 0	0 0	1 0 0	$a_4$
1 1 1	* *	* * *	*

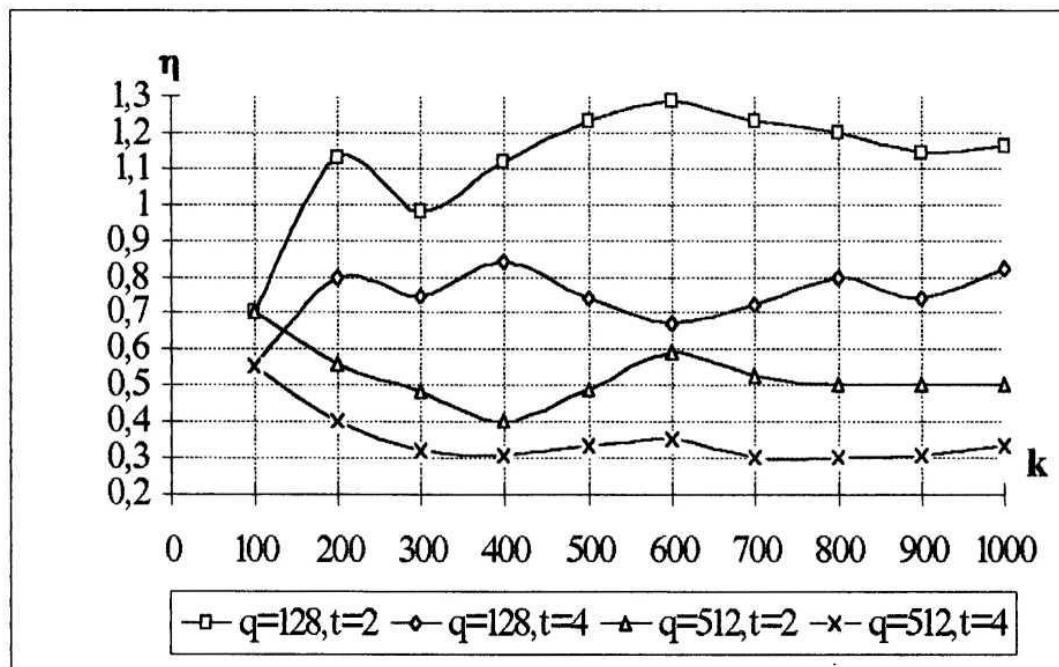
Рассмотрим функцию  $\eta$  при реализации МАС на ПЛИС. В этом случае коэффициенты  $k_1-k_6$  задаются выражениями (4.6)-(4.7), где  $S_n$ ,  $q_n$  – число входов и выходов ПЛИС соответственно.

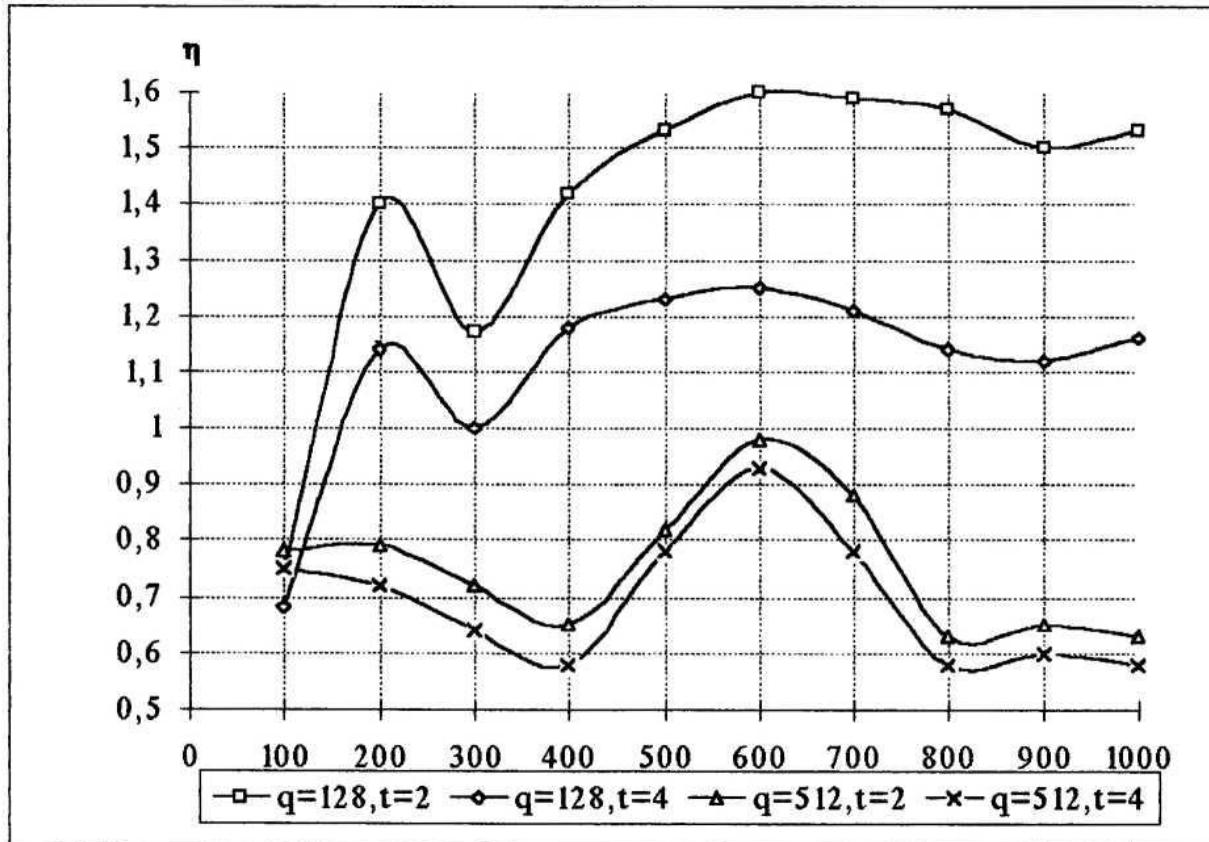
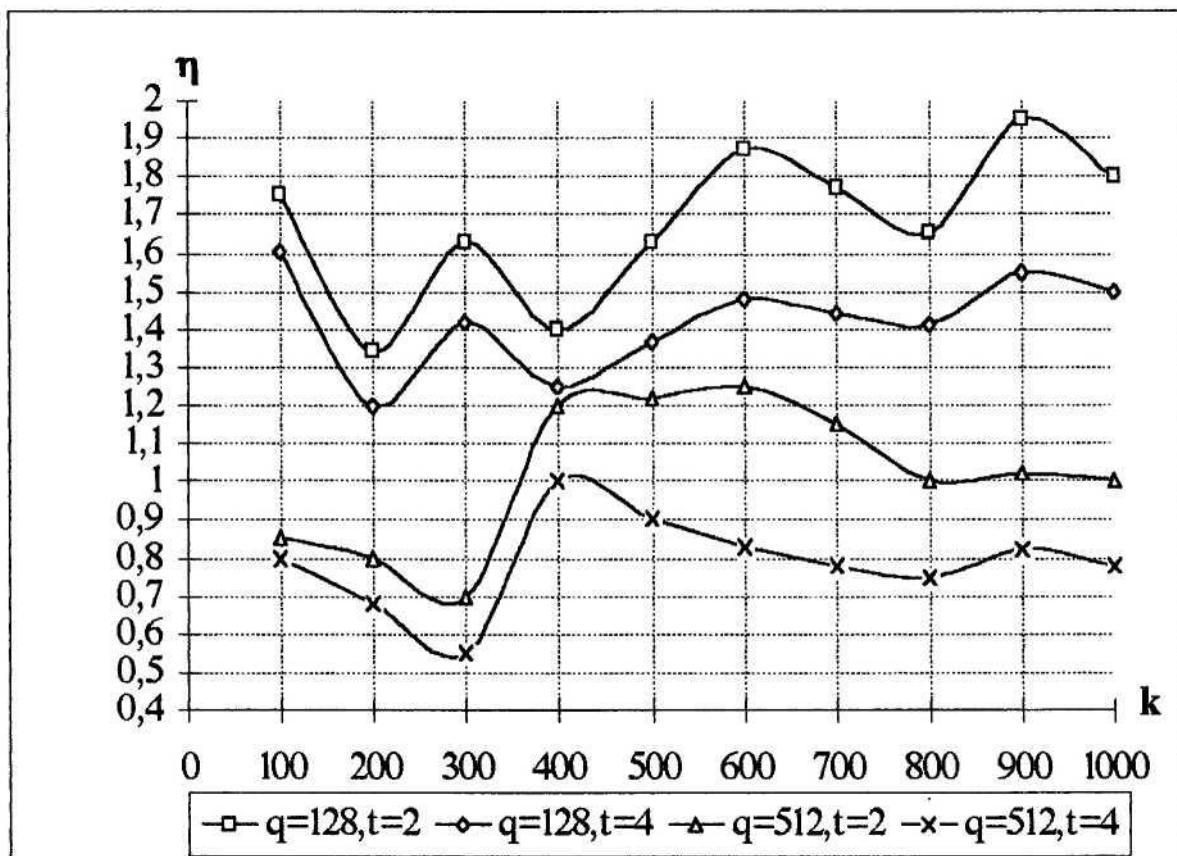
Результаты исследований для  $\chi_1 \in [0.47; 0.69]$ ,  $\chi_3 = 0.2$ ,  $\chi_4 = 0.5$  приведены на рисунках 4.30 - 4.33. Здесь параметры ПЛИС  $S_n = 16, 32, 64$  и  $q_n = 160, 480$  [129, с.250]. Анализ этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- выигрыш  $\eta$  не зависит от параметра  $q_n$  и определяется параметрами  $\chi_1$  и  $S_n$ ;
- выигрыш увеличивается по мере роста параметров  $\chi_1$  и  $S_n$ , то есть выигрыш тем больше, чем больше входов имеет ПЛИС и чем больше доля операторных вершин ГСА. Это связано с уменьшением требований к числу входов схемы МАС;
- выигрыш уменьшается по мере роста ёмкости и числа выходов ПЗУ, что связано с уменьшением числа ПЗУ в ММР при неизменных параметрах схемы МАС;
- максимальный выигрыш  $\eta$  составляет для выполненных исследований 2,3 и достигается при  $S_n = 32$ ,  $\chi_1 = 0.69$ ,  $q = 128$  и  $t = 2$ .

Входы							Термы	Выходы		
x1	x2	x3	x4	T1	T2	T3		b1	b2	b3
1	*	*	*	0	0	0	1	0	1	0
0	1	*	*	0	0	0	2	0	1	0
0	0	0	*	0	0	0	3	0	1	1
0	0	1	*	0	0	0	4	1	1	0
*	1	*	*	*	1	*	5,8,11	1	0	0
*	0	*	1	*	1	*	6,9,12	1	0	1
*	0	*	0	*	1	*	7,10,13	0	0	1
*	*	*	*	0	0	1	16	1	0	1

Рисунок 4.29 – Содержимое ПЛМ схемы МАС

Рисунок 4.30 – Зависимость  $\eta$  (t,q,q<sub>п</sub>) при  $\chi_1=0.47$ ,  $\chi_3=0.2$ ,  $\chi_4=0.5$ ,  $S_{\text{п}}=16$

Рисунок 4.31 – Зависимость  $\eta$  ( $t, q, q_{\Pi}$ ) при  $\chi_1=0.47, \chi_3=0.2, \chi_4=0.5, S_{\Pi}=32$ Рисунок 4.32 – Зависимость  $\eta$  ( $t, q, q_{\Pi}$ ) при  $\chi_1=0.69, \chi_3=0.2, \chi_4=0.5, S_{\Pi}=16$

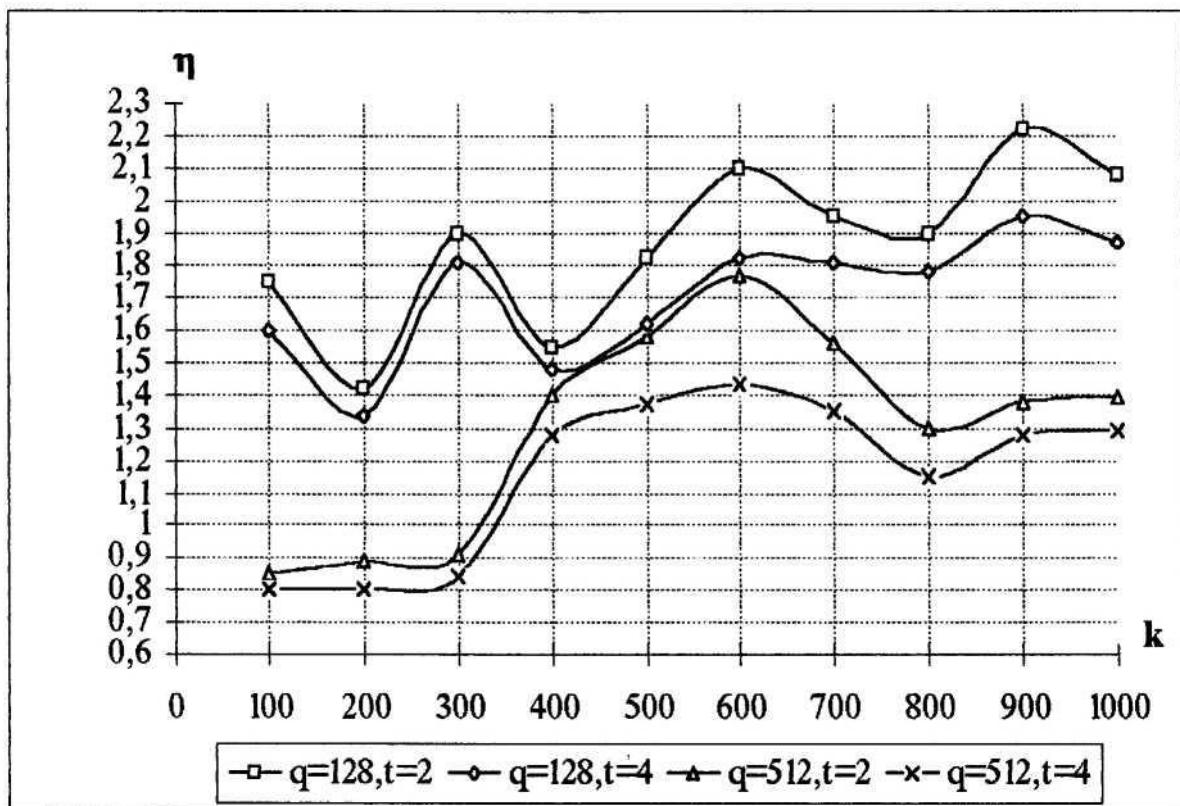


Рисунок 4.33 – Зависимость  $\eta$  ( $t, q, q_{\text{п}}$ ) при  $\chi_1=0.69$ ,  $\chi_3=0.2$ ,  $\chi_4=0.5$ ,  $S_{\text{п}}=32$

4.3.4 Рекомендации по применению и дальнейшему развитию теоретических основ процессов конвективного воздействия на многокомпонентные материалы

Теоретические исследования по разработке детерминированных математических моделей, основанных на уравнениях в частных производных, отражающих физику процессов, происходящих в неоднородной сплошной среде при конвективном воздействии механических устройств, является новым эффективным теоретическим инструментом исследования технологических процессов без проведения долгосрочных дорогостоящих промышленных экспериментов.

Разработанные программы могут быть применены к исследованию процессов подобного типа при проектировании аппаратов, работающих по принципу перемешивания реагирующих веществ.

Для дальнейшего использования разработанного комплекса программ к решению задач математического моделирования работы аппаратов подобного типа необходима доработка программ в следующем направлении:

- а) имеющиеся программы ориентированы на заданные конкретные параметры (концентрация, расходы, размеры), необходимо предусмотреть возможность простой настройки на любые параметры.
- б) разработанные программы существуют самостоятельно, и для проведения моделирования приходится отрабатывать их отдельно, а затем «вкладывать» результаты; необходимо скомпоновать единый программный модуль, который мог бы использоваться потребителем без специальной подготовки;
- в) программы для решения уравнений разработаны в безмерных величинах, в частности для расчета поля скоростей, необходимо модернизировать все программы при их объединении так, чтобы ввод и вывод проводить в реальных величинах, а настройка на безмерные параметры и обратно проводилась бы компьютером.

Предложенный подход в дальнейшем может быть расширен и дополнен функциями автоматического управления и автоматизированного проектирования для повышения качества выходной продукции, а также позволяет ставить и решать большой спектр статистических и математических расчетных задач, связанных с принятием решений, имеющих место в технологических системах. Развитие данной разработки может осуществляться путем дополнения ее новыми решениями в области аналитического и численного анализа технологических схем, усовершенствования методов организации и управления специализированными производствами.

#### 4.4. Выводы по разделу 4

1. Для реализации методов повышения эффективности процесса и качества продукции, получаемой путём конвективного воздействия на многокомпонентные смеси, предложено разработать систему автоматизированного управления процессом. Обоснованы назначение и структура системы.

2. Показано, что по сравнению с применением универсальных компьютеров на практике более предпочтительным является путь создания специализированного устройства управления, которое работает в непосредственной связи с технологическим оборудованием.

3. В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, либо в специализированном исполнении для использования в специальных условиях.

4. В качестве базового выбран автомат с «жёсткой» логикой, который является конечным цифровым автоматом и может быть синтезирован каноническим методом структурного синтеза.

5. Один из недостатков автомата с естественной адресацией (EA) микрокоманд – наличие управляющих микрокоманд безусловного перехода, которые вводятся для ликвидации критических ситуаций по адресации.

Для устранения этих недостатков предлагается метод введения преобразователя адреса микрокоманд, который формирует сигналы для управления счётчиком адреса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой получено новое решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в развитии и совершенствовании математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств для исследования процессов и обоснования параметров технологических систем, содержащих узлы конвективного типа, что обеспечивает повышение эффективности и качества производства композитных промышленных материалов, получаемых за счёт перемешивания многокомпонентных смесей.

Основные научные результаты, полученные в работе, можно сформулировать следующим образом.

1. В результате анализа данных теоретических и экспериментальных исследований ряда авторов и организаций показано, что одной из основных задач повышения эффективности процессов производства материалов на основе конвективного перемешивания является задача разработки новых методов теоретических и экспериментальных исследований. Наиболее эффективным современным средством решения данной задачи является метод математического моделирования с применением детерминированных математических моделей.

2. Разработаны математические модели основных типов:

а) модель идеального перемешивания, при котором концентрация твердой фазы является функцией только времени; модель построена таким образом, чтобы она учитывала концентрации компонент, поступающих в

конвективный аппарат, их расход и расход раствора, выходящего из аппарата;

б) одномерная модель перемешивания многокомпонентной среды в однолопастном аппарате с учетом вихревого течения раствора, при этом поле скоростей раствора рассчитывается в плоском случае из решения краевой задачи для уравнения Пуассона;

в) разработаны также осесимметрическая и плоская модели перемешивания, отличие которых от указанных выше моделей состоит в том, что концентрации являются соответственно функциями пространственных координат  $C(z,r,t)$  и  $C(x,y,t)$ .

3. Выполнена численная реализация краевых задач, составляющих математические модели, и разработаны алгоритмы для компьютерного моделирования процессов.

4. Разработаны компьютерные программы для реализации математических моделей всех типов и проведены исследования параметров процессов, определяющих направления совершенствования аппаратов.

5. Проведенные численные эксперименты позволили сформировать рекомендации по совершенствование конструкций аппарата для улучшения гидродинамических параметров.

6. Конструктивные усовершенствования, позволяющие повысить качество конечного продукта, заключаются в изменении положения источников исходных реагентов, изменении положения лопасти перемешивающего устройства с целью его максимального приближения к днищу реактора, а также в увеличении числа оборотов лопасти.

7. Для обеспечения оперативных инженерных расчётов на основании редукции краевой задачи к системе алгебраических соотношений построена критериальная модель, которая позволяет исследовать численным путем зависимость диаметра кристалла получаемого в аппарате вещества  $d$  от 19 переменных. Результаты численных просчётов с использованием данной модели позволяют установить соответствующие инженерные зависимости. Данной зависимостью можно пользоваться при прогнозировании величины удельной поверхности твёрдой фазы  $S_{уд}$  в зависимости от основных параметров при помощи компьютера.

8. Разработаны критерии оценки повышения эффективности процесса конвективного перемешивания при модификации технологических параметров в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объёме аппарата.

9. С использованием разработанных критериев проведено исследование эффективности процесса в зависимости от параметров технологической схемы, результаты которых подтверждают ранее полученные данные математического моделирования.

10. Разработана функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования (САПр) технологии процесса, на основании построенной математической модели разработан алгоритм функционирования головной программы математического обеспечения системы. По результатам исследований могут быть разработаны рекомендации, предназначенные для работников служб и подразделений

предприятий, выполняющих работы по проектированию и эксплуатации технологических схем и оборудования.

11. Для реализации методов повышения эффективности процесса и качества продукции, получаемой путём конвективного воздействия на многокомпонентные смеси, предложено разработать систему автоматизированного управления процессом. Обоснованы назначение и структура системы. В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом, реализуемый микроконтроллером.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование процессов обезвоживания обогащенного минерального сырья. Монография / Павлыш В.Н., Назимко Е.И., Тарабаева И.В., Науменко В.Г., Перинская Е.В. // под общ.ред. проф. Павлыша В.Н., проф. Назимко Е.И. – Донецк: «ВИК», 2014 . – 289 с.
2. Гарковенко Е.Е. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.И. Самойлов и др. Донецк: Норд-Пресс. – 2002. – 266 с.
3. Пилов П.И. Распределение частиц твердой фазы в турбулентном потоке жидкости при выделении осадка / П.И. Пилов // Науковий вісник НГА України. - 1998. - №1. - С. 74-77.
4. Полулях А.Д. Состояние подготовки и обогащение машинных классов рядового угля в Украине / А.Д. Полулях, О.В. Ищенко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 23 (64). - С. 21-26.
5. Кофанов А.С. Пути снижения влажности флотоконцентрата и тонкого шлама / А.С. Кофанов, Л.Т. Вертола, С.Ф. Абрамюк и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 23(64). - С. 142-146.
6. Пейчев И.Д. Исследование теоретических закономерностей течения жидкости через пористую среду / И.Д. Пейчев // Обогащение полезных ископаемых: Наук.-техн. зб. - Днепропетровск. – 2004. – Вып. 20 (61). – С. 99-104.
7. Пейчев И.Д. Техника и технология фильтрования угольных

сусpenзий / И.Д. Пейчев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 22(63). - С. 121-128.

8. Пейчев И.Д. Теоретические основы фильтрования угольных сусpenзий / И.Д. Пейчев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ – 2006. - вип. 25(66)-26(67). - С. 144-148.

9. Пейчев И.Д. Расчет оптимального давления фильтрования и некоторых конструктивных параметров фильтр-прессов / И.Д. Пейчев, Ю.М. Гарин, А.В. Пархоменко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – вип. 43(84) – С. 112-117.

10. Пейчев И.Д. Анализ существующих методов улавливания и обработки тонкодисперсных отходов углеобогащения / И.Д. Пейчев, Ю.М. Гарин, А.В. Пархоменко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – вип. 43(84) – С. 143-147.

11. Березняк А.А. Исследование влияния растворенных газов на фильтрование тонкодисперсных сусpenзий / А.А. Березняк // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ – 2006. - вип. 25(66)-26(67). - С. 148-151.

12. Абрамюк С.Ф. Исследования результатов работы шнекотолкающей центрифуги и пути ее усовершенствования в углеперерабатывающей промышленности / С.Ф. Абрамюк // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2006. – вип. 27(68)-28(69). – С. 98-110.

13. Березняк А.А. Исследование кинетики фильтрования через слой дистена крупностью 40-50 мкм / А.А. Березняк, Е.О. Козырь, Е.А.

Нестеренко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2006. – вип. 27(68)-28(69). – С. 126-132.

14. Березняк А.А. Исследование кинетики фильтрования через антрацит крупностью 40-50 мкм / А.А. Березняк // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2007. – вип. 31(72). – С. 86-88.

15. Анциферов А.В. Результаты экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию мела / А.В. Анциферов, А.А. Богданов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2007. – вип. 29(70)-30(71). – С. 190-194.

16. Богданов А.А. Динамика механического обезвоживания // А.А. Богданов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2008. – вип. 34(75). – С. 154-160.

17. Мацак А.Ф. Влияние режимных и конструктивных параметров осадительных центрифуг на влажность флотоконцентратов углей / А.Ф. Мацак, А.Г. Трошин, Н.Г. Пономарева // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2006. – вип. 27(68)-28(69). – С. 110-114.

18. Трошин А.Г. К обоснованию технологии обезвоживания мелкодисперсного угля / А.Г. Трошин, А.Ф. Мацак, А.А. Шкоп // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2009. – вип. 36(77)-37(78). – С. 177-187.

19. Вертола Л.Т. Расчетный метод определения скорости и толщины слоя осадка в роторах центрифуг со шнековой выгрузкой осадка. / Л.Т. Вертола М. Наука. – 1969. – 128с.

20. Сансиев В.Г. Анализ уравнений гидродинамики нестационарного

течения жидкости в диффузорной щели шпальтового сита / В.Г. Сансиев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2007. – вип. 29(70)-30(71). – С. 173-177.

21. Бевзенко Б.Ф. О необходимости ситовой классификации питания флотации на углеобогатительных фабриках / Б.Ф. Бевзенко // Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 23 (64). - С. 69-73.

22. Полулях А.Д. Энергетическая модель осаждения суспензий / А.Д. Полулях, О.В. Ищенко // Уголь Украины. – 2006. - № 2. - С. 42-44.

23. Полулях А.Д. Энергетическая интерпретация гравитационных разделительных процессов зернистых сред при обогащении полезных ископаемых. / А.Д. Полулях, и др . Луганск. – 2006. - 144 с.

24. Подопригора А.И. Энергетическое состояние зернистых смесей как характеристика их гранулометрического состава и разделительной способности / А.И. Подопригора, А.А. Клешнин, А.Д. Полулях // Сб. науч. Трудов НГАУ – 1998 - №3, Т4. - С. 108-113.

25. Полулях А.Д. Метод расчета регулирования производительности вакуум-фильтров изменением гранулометрического состава фильтруемого продукта / А.Д. Полулях, Е.А. Гончаренко// Геотехническая механика. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск. - 2000. - Вып. 22. - С. 58-63.

26. Гончаренко Е.А. Метод идентификации параметров обобщенного уравнения фильтрования / Е.А. Гончаренко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. НГАУ. - 2003. - №17 (58). С. 103-110.

27. Полулях А.Д. Определение границ применимости закона Дарси для зернистых сред / А.Д. Полулях, Е.А. Гончаренко, Ю.В. Кочетов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ. – 2000. – Вип. 10 (51). – С. 81-87.
28. Lin C.L. Fine Coal filtration as Revealed by 3D Lattice-Boltzmann Simulations / C.L. Lin, J.D. Miller, J.A. Mejia & al // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 504-515.
29. Videla A.R. Simulation of Saturated Fluid Flow in Packed Particle Beds / A.R. Videla, C.L. Lin, J.D. Miller // *J. Chin.Inst. Chem. Engrs.* – 2007. – 39:117.
30. Verma S. Evaluation of a Pilot-Scale Plate-and-Frame Filter Press for Dewatering Fine Anthracite Refuse / S. Verma, M.S. Klima // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 516-524.
31. Verma S. An Evaluation of a Pilot-Scale Plate-and-Frame Filter Press for Dewatering Fine Coal Refuse and Silica Sand / S. Verma // M.S. Thesis, The Pennsylvania State University, University Park. – 2009.
32. Patwardhan A. Dewatering Ultrafine Clean Coal in T.H. Filter Press / A. Patwardhan, Y.P. Chung, B.J. Arnold & al // *Coal Preparation* – Balkema ed. – 2006. – 26. – 33-54.
33. Dachang M. The Pressure Filtration Technology and Application of Equipment / M. Dachang, L. Chunfeng, S. Xiauhui // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 525-535.
34. Lin C.L. Pore Structure Analysis of Particle Beds for Fluid Transport Simulation During Filtration / C.L. Lin, J.D. Miller // *Int. J. Miner. Process.* –

2004. - 73:281.

35. Dong X. Effects of Electro-chemistry Pretreatment on Dewatering Characteristics of Fine Coal over Cu Electrode / X. Dong, S. Yao, W. Ren& al // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 536-540.
36. Yoon R.-H. Dewatering of Fine Coal Using Hyperbaric Centrifugation / R.-H. Yoon, Asmatulu R. // *Coal Preparation* – Balkema ed. – 2005. – 25(3): – 117-121.
37. Yoon R.-H. Development of Advanced Fine Coal Dewatering Technologies / R.-H.Yoon, M.K. Eryadin, J. Zhang & al // *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 575-583.
38. Keles S. Development of the Centribaric<sup>TM</sup> Dewatering Technology / S. Keles, G. Littrell, R.-H. Yoon & al // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 488-495.
39. Kuchma Yu. Combination of Centrifuges for Dewatering the Finely Dispersed Slurry and the Flotation Concentrate / Yu Kuchma, L. Vertola, S. Abramuk // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 496-503.
40. Полулях А.Д. Обезвоживание угольного шлама на сите вибрационного грохота /А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, С.Н. Ходос и др.// Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ. – 2004. – Вип. 20 (61). – С. 110-117.
41. Надутый В.П. Модельное исследование истечения жидкости в слое горной массы через дренажные каналы с сеточными выходными отверстиями /В.П. Надутый, Л.Н. Прокопишин, И.П. Хмеленко// Сб. научных трудов НГУ. – 2008. – Вып. 31. – С. 191-196.

42. Надутый В.П. Определение равновесного состояния тонкого слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита грохота /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др. // Науковий вісник НГУ. – 2008. – Вип. 9. – С. 81-85.
43. Надутый В.П. Определение условия равновесия слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др.// Вісник НТУ "ХПІ". – Харків. – 2008. – Вип. 38. – С. 22-28.
44. Елисеев В.И. Равновесные слои жидкости в капиллярной ситовой ячейке /В.И. Елисеев, В.И. Луценко, В.П. Надутый и др.// Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2008. – Вып. 74. – С. 44-54.
45. Назимко Е.И. Микроструктура кекафлотоконцентрата и ее роль в процессах обезвоживания / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2000. – вип. 9(50). - С. 93-99.
46. Надутый В.П. Результаты исследований процесса опускания жидкости в поровых каналах при обезвоживании горной массы / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – вип. 40(81). – С. 139-147.
47. Надутый В.П. Определение закономерностей опускания жидкости в поровых каналах влажной горной массы, лежащей на сетке /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др.// Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2009. – Вип. 22. – С. 71-74.
48. Надутый В.П. Разработка модели опускания жидкости в поровом

канале переменного сечения при обезвоживании слоя горной массы /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др./// Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук.праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2010. – Вип. 85. – С. 64-69.

49. Сергеев П.В. Развитие научных основ селективной флокуляции угля гидрофобными органическими реагентами. / П.В. Сергеев / Дисс. ... д-ра техн. наук. / НГУ. – Д. – 2008. – 348с.

50. Zasyadko A.V. Dewatering of Flotation Concentrates and Middlings on Belt Press Filters /A.V. Zasyadko, A.V. Kostromitin, S.A. Osadchiy& al// *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 545-548.

51. Bickert G. Coal Filtration with ANDRITZ Hyperbaric Filters – Operating Experience in Europe and Asia / G. Bickert, E. Frohnwieser, F. Denkinger // *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 584-590.

52. Полулях А.Д. Метод расчета регулирования производительности вакуум-фильтров изменением гранулометрического состава фильтруемого продукта / А.Д. Полулях, Е.А. Гончаренко // Геотехническая механика. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск. - 2000. - Вып. 22. - С. 58-63.

53. Parekh B.K. Improving Densification of Fine Coal Refuse Slurries to Eliminate Slurry Ponds / B.K. Parekh, D.P. Patil, Rick Honaker & al// *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 549-554.

54. Bickert G. Coal Tailings Dewatering Using Modern Membrane Filter Press – First Experience in Australia / G. Bickert, K. Barber, P. Poh // *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 568-574.

55. Antipenko L. Dewatering of Coal Suspensions during Filtration with Compressed Air / L. Antipenko, A. Kirichenko// *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 555-561.

56. Полулях А.Д. Реологическая модель высококонцентрированного илосодержащего угольного шлама / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, В.К. Гарус // Геотехническая механика. Сбнаучн. Тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2003. – вып. 41. – С. 184-188.

57. Полулях А.Д. Исследование реологической модели высококонцентрированного илосодержащего угольного шлама / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, В.К. Гарус // Вибрации в технике и технологиях. 2004. - №1 (33), С. 55-58.

58. Гарковенко Е.Е. Математическая модель процесса изменения концентрации фаз при движении многофазной среды / Е.Е. Гарковенко // Материалы III Научной школы “Импульсные процессы в механике сплошных сред”. - Николаев, сентябрь 1999. - С. 18-21.

59. Гарковенко Е.Е. Приемы моделирования пористой среды осадков при их фильтровании / Е.Е. Гарковенко // Труды международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», посвященной 100-летию В.Г. Гейера. Донецк. – 2003. - Т.1. – С. 62-68.

60. Гарковенко Е.Е. Методы моделирования процесса фильтрования жидкости через пористую среду осадка / Е.Е. Гарковенко / Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук.праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2005 - №56 - С. 27-34.

61. Гарковенко Е.Е. Анализ уравнения переноса вещества в

пористой среде тонкодисперсных осадков / Е.Е. Гарковенко // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – Дніпропетровськ. - 2003. – Вип.7. – С 49-55.

62. Гарковенко Е.Е. Особенности обезвоживания тонких трудно фильтруемых осадков / Е.Е. Гарковенко // Сб. Трудов НГУ. – 2003. - № 17. – т.1. – С. 88-93.

63. Назимко Е.И. Интенсификация процессов фильтрации тонкодисперсных угольных шламов импульсными полями / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. – 2004. - №1. – С. 317-319.

64. Nazimko L.I. Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation / L.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky& al // *Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. - China. - 2006.* - p. 785-798.

65. Надутый В.П. Экспериментальные исследования и моделирование процесса обезвоживания горной массы на грохоте с подстилающей сеткой / В.П. Надутый, В.И. Луценко, В.И. Елисеев и др.// Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків. 2009. – Вип. 25. – С.151-156.

66. Уваров И.И. Анализ техники и технологии обезвоживания тонкодисперсных угольных шламов / И.И. Уваров// Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ. – 2003. – Вип. 17 (58). – С. 101-103.

67. Гарковенко Е.Е. Моделирование процесса вакуумного фильтрования угольных шламов / Е.Е. Гарковенко// Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. – 2004. - №1. – С. 317-319.

68. Cundall P.A. A discrete numerical Model for granular assemblies / P.A. Cundall, O.D.L. Strack // *Geotechnique*, 29, # 1, pp. 47-65 (1974).
69. Nazimko O.I. Simulation of the Coal and Rock Particle Interaction Kinetics During the Dry Separation / O.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky& al // *Proceedings of XVI International Congress of Coal Preparation. USA. 2010. p. 581-586.*
70. Корчевский А.Н. Моделирование процесса пневматического разделения лома цветных металлов / А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко // Вісник КТУ вип 21 2008 С. 62-66.
71. Назимко Е.И. Исследование процесса флотации угольных частиц на микроуровне / Е.И. Назимко, И.Н. Друц, Л.И. Серафимова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Вип. 15(131), серіягірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. С. 115-121
72. Назимко Е.И. К вопросу об исследовании перемещения влаги в порах осадков при их переменной проницаемости / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко // Збагачення корисних копалин. Вип. 21 (62). Дніпропетровськ 2005. - с. 86-92
73. Гарковенко Е.Е. Интенсификация обезвоживания тонких труднофильтруемых осадков / Е.Е. Гарковенко// Матеріали міжнародної конференції “Форум гірників - 2005”. – 2005. – т. 1 (А-Г), с. 185-191.
74. Гарковенко Е.Е. Интенсификация механического обезвоживания осадков тонкодисперсных углесодержащих материалов / Е.Е. Гарковенко // Вісник КТУ вип. 13 2006 с. 90-94
75. Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е., Науменко В.Г. Исследование

свойств тонкодисперсных осадков продуктов обогащения, имеющих значение при обезвоживании / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.Г. Науменко // Разработка рудных месторождений - КТУ №91 2007 с. 117-121.

76. Науменко В.Г. Методика исследования свойств тонкодисперсных осадков углеобогащения при их механическом обезвоживании / В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 29-30 – С. 178-184

77. Науменко В.Г. Методика исследования и экспериментальная установка для определения параметров тонкодисперсных осадков / В.Г. Науменко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Вип. 15(131), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – С. 127-133.

78. Назимко Е.И., Науменко В.Г. Моделирование процесса удаления влаги из углесодержащих осадков. / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ. – 2011. – вип. 45(86) – С. 153-158.

79. Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е., Науменко В.Г. Моделирование процесса фильтрования при механическом воздействии на осадок. / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.Г. Науменко // Вісник КТУ Зб.наук. праць - КривийРіг, - 2011. - вип. 27 - С.191-195.

80. Назимко Е.И., Науменко В.Г. Имитационное моделирование изменения поровой структуры осадков при механическом воздействии. / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. (Доклады XV междунар. науч.-практ. конф. «Обогащение полезных ископаемых» г.

Бердянск, 24-26 мая 2012 г) – Дніпропетровськ. – 2012. – вип. 50(91) – С. 158-163.

81. Блюсс Б.А. Расчет областей миграции частиц полидисперсного разноплотностного материала по сечению трубопровода при напорном гидротранспорте / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин// Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ. - 2005. – Вип. 22(63) – С. 115-121.

82. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Математическое моделирование машин, включающих узлы конвективного типа. / «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Международный сборник научных трудов, вып. 21. ДонГТУ, Донецк, 2002, с 178-184.

83. Математическое моделирование процессов обогащения полезных ископаемых. Монография/ Павлыш В.Н., Назимко Е.И., Корчевский А.Н., Перинская Е.В., Серафимова Л.И., Голиков А.С. // под общ.ред. проф. Павлыша В.Н. и проф. Назимко Е.И. – Донецк: «ВИК», 2014. – 466 с.

84. V.N. Pavlysh, L.A. Lazebnaya, Ismail HaserDayeh, E.V. Perinskaya The mathematical modeling and automatic control of pneumohydrodynamic treatment process on underground rock massifs/ научный журнал «ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА», № 1. – Донецк: ДонНТУ, 2015.-с.104-109.

85. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. - М.: Наука, 1976. - 498с.

86. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. - М.: Химия, 1968. - 378с.

87. Кафаров В. В. Основы массопередачи. - М.: Высшая школа,

1962. - 317с.

88. Кафаров В.В., Еременко В.В., Бирюков Д.П. Процессы химической технологии. - М.: Наука, 1965. -417с.
89. Carabedian P.R., Lewy H., Schiffer M., Anally symmetric cavitation flow. Ann. of Math., 1952, 56, с. 560-602.
90. Friedrichs K.O. Uberein Minimum problem fur Potehtialstromungen mitfreicRande. Math. Arm., 1933, 109с.
91. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана. - Вычислительная математика и математическая физика. 1965, 5, №5, с. 816-827.
92. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Расчет параметров машин, содержащих конвективные узлы, с применением компьютеров. Международный сборник трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», вып. 26, с. 10-15. Донецк, 2003
93. Самсонов А.И. Исследование и оценка содержания драгоценных металлов в электронном ломе на первых стадиях шихтоподготовки / А.И. Самсонов, К.П. Козловский, Т.И. Шуляк и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. - №2. – С. 73-76.
94. Кравченко Н.Д. Основные направления повышения эффективности использования легких и тяжелых цветных металлов. / Н.Д. Кравченко, В.Н. Бредихин, Ю.М. Дубинский - М: Цветметинформация, 1980. – 40 с.
95. Бредихин В.Н. Технологические проблемы переработки алюминиевых отходов / В.Н. Бредихин, В.А. Кожанов, В.Ю. Кушнерова//

XIV МНТК «Машиностроение и техносфера ХХI века». – Севастополь. – 2007. – С. 112-116.

96. Шевелев А.И. Создание комплекса по переработке лома и отходов цветных металлов. // Металл и литье Украины. – 2004. - №3-4. – С. 45-51.

97. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Математическое моделирование процессов функционирования специализированных аппаратов конвективного типа / международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта», 2015 № 1(15). – Донецк, ГУ ИПИИ, 2015. – с.89-98.

98. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Постановка задачи математического моделирования процесса конвективной диффузии многокомпонентной смеси при производстве композитных материалов / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // Сборник трудов VIII Международной научно-методической конференции в г. Хаммамет (Тунис) с 28 сентября по 5 октября 2014 г. – Донецк: МСМ, 2014. – С. 102-105

99. Смирнов В.А. Обогащение руд и отходов цветных металлов / В.А. Смирнов, В.Н. Бредихин, А.И. Шевелев. - Донецк: Изд. Дом Кальмиус, 2008. – 500 с.

100. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Моделирование и расчет параметров машин, содержащих конвективные узлы и дополнительные конструкции. /«Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Международный сборник научных трудов, вып. 28. ДонНТУ, Донецк, 2004,

с. 224-230.

101. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Математическое моделирование процесса конвективного перемешивания компонентов ферритового материала для электронной техники / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции в г. Севастополе, 15 – 20 сентября 2014 г. – Донецк: МСМ, 2014. – С. 202-206

102. Павлыш В.Н., Штерн Ю.М. Основы теории и параметры технологии процессов гидропневматического воздействия на угольные пласты / Монография. - Донецк: «ВИК», 2007. - 400 с.

103. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А., Перинская Е.В. Применение математического моделирования к исследованию параметров динамических процессов / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // Сборник трудов VII Международной научно-методической конференции в городе Сусс (Тунис) с 08 по 17 октября 2013 г. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – с.184-188.

104. Павлыш В.Н., Чеснокова О.В. Разработка системы автоматизированного проектирования технологических схем нагнетания жидкости в угольный пласт // Вісті Донецького гірничого інституту. - Донецьк: ДонНТУ, 2003. - №2. - С. 8-14.

105. Мороз О.К., Павлыш В.Н., Аль-Дахле М.З. Автоматизация управления процессом гидродинамической обработки угольного пласта // Матер.междунар. конф. «III школа геомеханики». - Польша, Гливице-Устронь, 1997. - Часть II. - С.133-136.

106. Перинская Е. В. Математическое моделирование и автоматизация проектирования аппаратов, содержащих узлы конвективного типа / научный журнал «ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА», № 1(15). – Донецк: ДонНТУ, 2019.- с.21-27.
107. Павлыш В.Н., Перинская Е.В., Турчанин Г.И. Разработка структуры системы автоматизированного проектирования специализированного оборудования конвективного типа / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // Сборник трудов IX Международной научно-методической конференции в городе Сухум с 01 – 09 октября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. – с.188-191.
108. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Математическое моделирование процессов производства неметаллических материалов с применением критериальных зависимостей / «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Международный сборник научных трудов, вып. 32. Донецк, 2006, с.167-171.
109. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Задача автоматизации проектирования оборудования для получения сопутствующих материалов при обогащении полезных ископаемых / Вісті Донецького гірничого інституту // Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю №1(34)-№2(35), 2014. – Донецьк:ДонНТУ, 2014. – с.399-405.
110. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов: Монография / В.Н. Ткаченко – Киев: «Наукова думка», 2008.– 243с.
111. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Аппроксимированная модель

процесса получения материалов из сопутствующего сырья при обогащении полезных ископаемых // Проблемы горного дела и экологии горного производства: Матер. IX междунар. науч.-практ. конф. (24-25 апреля 2014 г., г. Антрацит). – Донецк: Донбасс, 2014. – с. 19 – 24.

112. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Редукция краевой задачи моделирования процесса получения сопутствующих материалов при обогащении полезных ископаемых к системе критериальных зависимостей / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. Т. 2. – с. 68-71.

113. Павлыш В.Н., Аль-Дахле М.З. Минимизация числа микрокоманд в автомате с комбинированной адресацией // Информатика, кибернетика и вычислительная техника. – Донецк: Изд. ДонГТУ, 1997. – Выпуск 1. – С. 151-158.

114. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В.Кафаров, М.Б.Глебов – М.: «Высшая школа», 1991.– 399 с.: илл.

115. Уэйкерли Дж. Проектирование цифровых устройств, том 2. / Дж.Уэйкерли. – М.: Постмаркет, 2002.– 1064 с.

116. Крамер Г. Математические методы статистики /Г. Крамер – М: «Мир», 1975.– 648 с.: илл.

117. Пьявченко Т.А. Автоматизированные информационно-управляющие системы / Т.А. Пьявченко, В.И. Финаев. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 271 с.

118. Geering H.P. Optimal control with engineering applications / H.P. Geering. – Springer, 2007. – 141 p.
119. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А., Турчанин Г.И. Совершенствование системы управления процессом гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. Т. 2. – с. 64-67.
120. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. Модификация характеристик аппаратурного обеспечения системы управления процессом увлажнения угольного пласта / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // Сборник трудов IX Международной научно-методической конференции в городе Сухум с 01 – 09 октября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. – с.183-187.
121. «Автоматизация управления процессом нагнетания жидкости в угольный массив» /Сост.: Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. Материалы международной конференции по управлению «Автоматика – 2002», 16 – 20 сентября 2002 г., Донецк, стр. 231 – 235.
122. «Разработка структуры специализированного вычислительного устройства для контроля параметров и управления технологическим процессом гидравлического воздействия на угольные пласты»/ Сост.: В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная. Материалы седьмого международного научно-технического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». Книга 2, Таганрог - Донецк, 2006. - стр. 146 – 149.
123. Баркалов А.А. Синтез микропрограммных устройств управления.

– ДПИ: Донецк, 1992. – 48с.

124. Кравцов Л.Я., Чернецкий Г.И. Проектирование микропрограммных устройств. – Л.: Энергия, 1976.–149с.
125. Верлань А.Ф. Математическое моделирование непрерывных динамических систем / А.Ф. Верлань, С.С. Москалюк. – К.: Наукова думка, 1988. – 287 с.
126. Баранов С.И., Скляров В.А. Цифровые устройства на программируемых БИС с матричной структурой.– М.: Радио и связь, 1986.– 272с.
127. Зарубежные интегральные схемы для промышленной электронной аппаратуры: Справочник.– М.: Энергоатомиздат, 1989.– 288с.
128. Новиков С.В. Метод реализации систем булевых функций сетью из программируемых логических матриц//Автоматика и вычислительная техника.– 1980, № 6.– с.43-48
129. Палагин А.В., Денисенко Е.Л., Белицкий Р.И., Сигалов В.И. Микропроцессорные системы обработки информации.– К.: Наукова думка, 1993.–352 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Копия акта о внедрении результатов научных разработок в производственно-технологическом отделе ООО «Славен»

Общество с ограниченной ответственностью  
ООО «СЛАВЕН»



Равловская Л.А.

«12» мая 2019 г.

## А К Т

о внедрении результатов научных разработок  
кафедры прикладной математики ГОУВПО ДонНТУ в области  
математического моделирования и расчёта параметров аппаратов  
конвективного типа, осуществляющих процесс перемешивания влажных  
многокомпонентных материалов  
(автор ассистент Перинская Е.В., руководитель д.т.н., проф. Павлыш В.Н.)

Комиссия в составе:

Холодов К.А.	- главный инженер;
Остаповец Б.А.	- главный технолог;
Баксан А.В.	- мастер производственного участка.

подтверждает, что разработанные авторами математические модели и рекомендации по их применению приняты к использованию в производственно-технологическом отделе ООО «СЛАВЕН» для определения и управления параметрами процессов перемешивания влажных многокомпонентных неоднородных материалов (флокулянтов) в закрытых аппаратах конвективного типа, с целью использования при подготовке матричных растворов в водооборотных замкнутых циклах при осветлении оборотной воды и сгущении мелкодисперсных материалов.

Председатель комиссии  
Члены комиссии

Холодов К.А.  
Остаповец Б.А.  
Баксан А.В.

Общество с ограниченной ответственностью  
ООО «СЛАВЕН»



Равловская Л.А.

«12» мая 2019 г.

ПРОТОКОЛ  
технического совещания рабочей группы  
г. Ростов-на-Дону

«12» мая 2019 г. № 3/05.19

Председатель *Холодов К.А.*

Секретарь *Мажан О.К.*

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

Члены рабочей группы: Холодов К.А., Гуменюк К.В., Баксан А.В.,  
Рубан Н.Н., Мажан О.К.

Приглашенные: сотрудники кафедры прикладной математики ГОУВПО  
ДонНТУ д.т.н., проф. Павлыш В.Н. и ассистент Перинская Е.В.

ПОВЕСТКА ДНЯ:

о предложениях ГОУВПО ДонНТУ по применению результатов разработок  
математических моделей процессов перемешивания влажных  
многокомпонентных неоднородных материалов, выполненных кафедрой  
прикладной математики ДонНТУ, в исследованиях параметров аппаратов  
конвективного типа.

Докладчик д.т.н., проф. Павлыш В.Н.

СЛУШАЛИ:

сообщение представителя ГОУВПО ДонНТУ д.т.н., проф. Павлыша В.Н.  
о предложениях по применению разработанных математических моделей.

Кафедрой прикладной математики ГОУВПО ДонНТУ разработаны  
математические модели процессов распределения концентрации и скорости  
частиц неоднородной влажной многокомпонентной массы в рабочем объеме  
аппарата при осуществлении принудительной конвекции с целью получения  
гомогенного конечного продукта с заданными свойствами.

В результате теоретических исследований предложены

детерминированные математические модели, основанные на уравнениях в частных производных, описывающих физические процессы, происходящие при перемешивании влажных исходных компонентов вещества в закрытом аппарате под воздействием вращения лопасти как основного элемента конвективного узла.

Рассмотрены результаты численной реализации моделей на основе конечно-разностных методов.

Конечный результат работы моделирующих программ – распределение концентраций твердой фазы по сечению реактора вдоль вертикальной оси в процессе работы аппарата. После идентификации модели можно проводить исследования процесса для различных значений определяющих параметров.

В представленной работе принято, что концентрации исходных материалов и жидкой фазы, а также коэффициенты диффузии постоянны, неизменны форма и размеры реактора, варьируется скорость вращения лопасти и ее геометрическое положение, а также координаты входных трубопроводов. Моделировались различные варианты изменения этих параметров и исследовалось их влияние на конечный результат.

В результате моделирования процесса при различном расположении входных трубопроводов влияние на результат оказывается разное и картина распределения конечного вещества искажается. При задании источника в одной точке влияние оказывается суммарное и на всем сечении одинаковые, в связи с чем в дальнейшем рекомендуется задавать координаты источников совпадающими.

В результате моделирования процесса при различном расположении лопасти с постоянной скоростью вращения показано, что с точки зрения максимально возможного предотвращения «залегания осадка» наилучшим положением является максимально приближенное к днищу.

В результате моделирования влияния вариации скорости вращения лопасти показано, что скорость должна быть максимально возможной, но ограниченной, во-1-х, техническими возможностями оборудования, а, во-2-х, опасностью разрушения кристаллов выходного вещества.

#### Выходы.

Математическое моделирование позволило установить ориентировочные параметры, обеспечивающие рациональный гидродинамический режим работы реактора, а именно: расположение источников исходных материалов в общей точке, скорость вращения лопасти 350-400 об/мин, положение лопасти в придонной области, а также скорость вращения лопасти 500-550 об/мин при расположении источника над диффузором и 700 об/мин при его расположении под диффузором.

При реконструкции аппарата для улучшения гидродинамических характеристик процесса рекомендуется:

- обеспечить максимальное сближение источников исходных материалов для обеспечения более равномерного распределения твердой фазы в рабочем объеме;

– обеспечить максимально высокую скорость вращения лопасти мешалки и ее максимальное приближение к днищу реактора для предотвращения «залегания» твердой фазы.

Разработанные модели предлагаются к использованию в ООО «Славен» при управлении процессами перемешивания влажного неоднородного материала в закрытых аппаратах конвективного типа. Предложенные модели и результаты их реализации приведены в диссертационной работы Перинской Елены Владимировны «Математическое моделирование и обоснование параметров аппаратов, осуществляющих процесс перемешивания неоднородных материалов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

**В обсуждении приняли участие:** Холодов К.А., Гуменюк К.В., Баксан А.В., Рубан Н.Н., Мажан О.К.

Отмечено, что авторами впервые разработаны детерминированные математические модели процессов распределения поля концентрации и скорости частиц при перемешивании влажной неоднородной массы в рабочем объёме конвективного аппарата на базе уравнений математической физики и их компьютерная реализация с использованием разностных методов. Поступило предложение рекомендовать предложенные математические модели программные комплексы к применению.

**ПОСТАНОВИЛИ:**

1. Предложенные ГОУВПО ДонНТУ математические модели и программные комплексы рекомендовать к применению в производственном отделе ООО «Славен» при управлении процессами перемешивания влажного неоднородного материала в закрытых аппаратах конвективного типа.

2. Сотрудникам производственного отдела ООО «Славен» изучить рекомендации ГОУВПО ДонНТУ по применению математических моделей и принять их к использованию для исследования процессов и расчёта параметров аппаратов, осуществляющих перемешивание влажных неоднородных материалов.

Директор

Равловская Л.А.

Начальник опытного производства

Гуменюк К.В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Копия справки о внедрении результатов исследований в учебный  
процесс

**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА**  
**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ**  
**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**  
**ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**  
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: [donntu.info@mail.ru](mailto:donntu.info@mail.ru)

14.05.2016 № 52.1-04/19

На № \_\_\_\_\_

## С П Р А В К А

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Перинской Елены  
Владимировны «Математическое моделирование и обоснование параметров аппаратов,  
осуществляющих процесс перемешивания неоднородных материалов», представленной на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 –  
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические  
науки).

В ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» приняты к внедрению  
в учебный процесс и используются при чтении лекций и проведении практических  
(лабораторных) занятий для подготовки бакалавров на кафедрах «Прикладная математика» (ПМ)  
и «Искусственный интеллект и системный анализ» (ИИСА) следующие разработки,  
полученные в диссертационной работе Перинской Е.В.:

- детерминированная математическая модель процесса перемешивания влажной много компонентной смеси в закрытом аппарате, основанная на нелинейных уравнениях математической физики, с учетом вынужденной конвекции массы за счет перемешивания вещества лопастью с варьируемой угловой скоростью (направление подготовки 01.03.04 «Прикладная математика», дисциплины: «Уравнения математической физики», «Математическое моделирование»);
- алгоритмы и программы для компьютерной реализации модели с использованием разностных методов (н.п. 01.03.04 «ПМ», дисц. «Вычислительная математика», «Разностные методы решения краевых задач»; н.п. 09.03.02 «Информационные системы и технологии», дисц. «Численные методы»);
- критериальные зависимости для ориентировочного инженерного расчёта основных параметров при проектировании аппаратов (н.п. 01.03.04 «ПМ», дисц. «Математические пакеты прикладных программ»).



Первый проректор  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный  
технический университет»  
Нач. учебного отдела  
Зав. каф. ПМ  
Зав. каф. ИИСА  
М.П.

А.А. Каракозов

Б.В. Гавриленко

В.Н. Павлыши

А.С. Миненко