

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Часть 4

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки специалистов 151701 "Проектирование
технологических машин и комплексов"*



Тамбов
◆Издательство ФГБОУ ВПО "ТГТУ"◆
2014

УДК 54.058(075)
ББК Н76я73
И741

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой "Информационные технологии в образовании"
ФГБОУ ВПО "Институт развития дополнительного профессионального
образования"
Т. В. Истомина

Доктор технических наук, профессор, проректор по информатизации
ФГБОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"
В. Е. Подольский

Технический директор ЗАО "Завод Тамбовполимермаш"
М. А. Смолин

Коллектив авторов:

*В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб,
Е. Н. Малыгин, С. Я. Егоров, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко,
Т. А. Фролова, Ю. В. Немтинова*

И741 Информационные технологии при проектировании и управлении
техническими системами : учебное пособие : в 4-х ч. / В. А. Немтинов,
С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ
ВПО "ТГТУ", 2014. – Ч. 4. – 160 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1241-8.

Охватывает широкий спектр задач математического и программного обеспечения различных подсистем автоматизированного проектирования и управления техническими системами. Описаны математические методы в технических расчётах и программные среды, используемые при автоматизированном проектировании технологического оборудования; теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования; технология исследования химико-технологических объектов в режиме удалённого доступа; технология интерактивного 3D-моделирования при создании виртуальных тренажёрных комплексов и др.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки специалистов 151701 "Проектирование технологических машин и комплексов", а также аспирантов, проводящих исследования в области оптимального проектирования и управления техническими объектами.

УДК 54.058(075)
ББК Н76я73

ISBN 978-5-8265-1241-8 (4 часть) © Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический
университет" (ФГБОУ ВПО "ТГТУ"), 2014
ISBN 978-5-8265-1227-2 (общ.)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава 1. Математические методы в технических расчётах	9
1.1. Постановка задач исследования и проектирования технической системы	11
1.1.1. Математическая постановка задачи исследования	12
1.2. Декомпозиция глобальной задачи исследования	20
1.3. Математическое моделирование технической системы	23
1.3.1. Основные положения	23
1.3.2. Методы построения математических моделей объектов исследования и проектирования	29
1.3.3. Решение уравнений модели. Адекватность модели ...	32
Вопросы для самопроверки	35
Список литературы к главе 1	35
Глава 2. Решение интервальных математических моделей технологических процессов	36
Вопросы для самопроверки	48
Список литературы к главе 2	48
Глава 3. Оптимальное проектирование теплообменников типа "труба-в-трубе" на основе оценки приведённых затрат	49
3.1. Назначение и область применения теплообменников типа "труба-в-трубе"	49
3.2. Постановка задачи оптимального проектирования теплообменников типа "труба-в-трубе"	50
3.3. Система автоматизированных оптимальных расчётов теплообменников типа "труба-в-трубе"	54
3.4. Примеры расчётов	55
3.5. Исходные данные для расчёта и выбора теплообменника ...	57
Вопросы для самопроверки	58
Список литературы к главе 3	58
Глава 4. Проектирование нагревательных плит вулканиза- ционных прессов: сравнительный анализ подходов	59
4.1. Интегральный подход: получение равномерного температурного поля	60

4.2. Дифференциальный подход: применение зонного обогрева	62
4.3. Комплексный подход: проектирование нагревательных плит с учётом применяемых пресс-форм и выпускаемых изделий	68
Вопросы для самопроверки	70
Список литературы к главе 4	71
Глава 5. Методика оптимизации параметров нагревательной плиты вулканизационного прессы	72
5.1. Содержание методики оптимизации параметров нагревательных плит	73
5.2. Проведение численных экспериментов	74
5.3. Выбор оптимального экспериментального плана и проверка адекватности аппроксимирующей зависимости	80
5.4. Условия и результаты поиска минимума поверхности отклика	83
Вопросы для самопроверки	86
Список литературы к главе 5	86
Глава 6. Программное обеспечение автоматизированных систем размещения объектов в пространстве, инвариантное к предметной области	88
6.1. Определение N-ориентированного гиперграфа	90
6.2. Структура базы данных для представления N-ориентированного гиперграфа	91
6.3. Функции базы ограничений	94
6.4. Элементарные ограничения и их представление в SQL-нотации	95
6.4.1. Ограничение на значение свойства вершины	95
6.4.2. Ограничение на значение свойства ребра	96
6.4.3. Комбинации ограничений	97
6.5. Правила, ограничивающие принадлежность вершины ребру	100
6.5.1. Правила первого рода	100
6.5.2. Правила второго рода	101
6.5.3. Правила третьего рода	102
6.6. Правила, определяющие свойства ребра в зависимости от свойств вершины	103

6.7. Правила, определяющие свойства вершин в зависимости от свойств ребра	105
6.8. Правила, определяющие свойства вершины в зависимости от свойств других вершин	106
6.9. Хранение и обработка правил	106
Вопросы для самопроверки	109
Список литературы к главе 6	110
Глава 7. Распараллеливание вычислений при реализации волнового алгоритма трассировки трубопроводов ХТС	111
Вопросы для самопроверки	122
Список литературы к главе 7	122
Глава 8. Технология исследования химико-технологических объектов в режиме удалённого доступа	123
8.1. Информационно-логическая модель технологических процессов химико-технологической системы	123
8.2. Комплексное использование различных программных сред при моделировании химико-технологических объектов ...	127
Вопросы для самопроверки	132
Список литературы к главе 8	133
Глава 9. Имитационное моделирование динамических процессов при управлении транспортными системами	134
9.1. Разработка математической модели функционирования транспортной сети	135
9.2. Реализация имитационной модели и системы её автоматизированного построения в среде SIMUL8	138
Вопросы для самопроверки	143
Список литературы к главе 9	143
Глава 10. Применение технологий интерактивного 3d-моделирования при создании виртуальных тренажёрных комплексов	145
Вопросы для самопроверки	157
Список литературы к главе 10	158
Заключение	159

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития проектирования и управления техническими системами предполагает использование информационных технологий на всех этапах жизненного цикла.

Основными этапами жизненного цикла технических систем (ТС) являются проектирование, монтаж и эксплуатация, последующая реконструкция или утилизация системы. В процессе проектирования осуществляется поиск функциональных решений, представляемых и документируемых в виде функциональной структуры, которая затем может быть материализована с помощью определённых предписаний. Эти предписания служат для изготовления компонентов системы и составляются таким образом, чтобы все функциональные требования были выполнены. В этом смысле процесс проектирования предполагает получение не только всех необходимых чертежей изделия, но и разработку технологических процессов его изготовления. Целью проектирования является разработка и формирование функций технической системы путём переработки технологической и организационной информации.

Во всех отраслях промышленности установлены следующие стадии разработки конструкторской документации: техническое задание (ТЗ), техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая документация. Часто стадии разработки технического проекта и рабочей документации объединяют в одну. Все перечисленные стадии подготовки технической документации являются результатом выполнения определённых этапов проектирования.

Функционирование ТС требует наличия автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и системы оперативного управления производством (СОУ). Данные системы ориентированы на применение современной вычислительной техники и разрабатываются, как правило, на базе известных SCADA и ERP систем. Они предназначены для решения задач оперативного контроля состояний технологического процесса и оборудования ТС, управления производственным процессом, формирования плана выпуска продукции и проведения планово-предупредительных ремонтов, решения организационных вопросов и др.

Современный уровень развития информационных и коммуникационных технологий на производстве позволяет активно использовать передовые системы автоматизации технологического процесса и управления выпуском продукции и предприятием в целом. Создание единой информационной системы промышленного предприятия позволяет осуществить комплексное решение задач управления выпус-

ком продукции, опираясь на взаимодействие интегрированных автоматизированных информационных систем.

Первая часть учебного пособия включает:

- общие сведения о системах автоматизированного проектирования технологического оборудования (ТО) и геоинформационных системах проектирования и эксплуатации технических объектов;
- представление структуры ТО и его типовых элементов в информационных системах;
- структуру, функции и приёмы работы с автоматизированными информационными системами (АИС) компонок ТО, технологических расчётов теплообменного оборудования, автоматизированного составления месячных графиков ремонтов ТО;
- приёмы использования системы моделирования динамических процессов для оперативного управления промышленным производством;
- методики применения средств мультимедиа при создании АИС обучения персонала предприятий химического и машиностроительного профиля.

Во вторую часть пособия вошли:

- сведения о постановках задач, методах их решения и программных средах, используемых при автоматизированном проектировании технологического оборудования;
- теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования;
- описание технологии поддержки принятия решений для проектирования технологических процессов класса производственных систем сложной структуры (на примере машиностроительных производств);
- описание различных методов прогнозирования ёмкости рынка многоассортиментной малотоннажной продукции с помощью аппарата нейронных сетей;
- методики проектирования тренажёрного комплекса для обучения персонала технической системы.

Третья часть пособия посвящена:

- краткосрочному прогнозированию производительности основного оборудования технических систем;
- модернизации химико-технологических систем действующего многоассортиментного производства при изменении планов выпуска продукции;
- разработке информационно-логической модели трассировки технологических трубопроводов;

- разработке методики расчёта и выбора механических перемешивающих устройств вертикальных ёмкостных аппаратов;
- моделированию процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе;
- разработке технологии автоматизированного синтеза системы оборотного водоснабжения химического предприятия;
- разработке комплекса виртуальных тренажёров для обслуживающего персонала систем подготовки и очистки воды;
- разработке технологии создания электронных многоцелевых банков данных;
- организации диалога с пользователями в информационных системах управления производством;
- представлению тематических пространственно распределённых данных в сети интернет.

Четвёртая часть учебного пособия включает:

- математические методы в технических расчётах и программные среды, используемых при автоматизированном проектировании технологического оборудования;
- теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования;
- технологию исследования химико-технологических объектов в режиме удаленного доступа;
- технологию интерактивного 3D-моделирования при создании виртуальных тренажёрных комплексов и др.

Авторы надеются, что данное учебное пособие будет полезно для:

- студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки специалистов 151701 "Проектирование технологических машин и комплексов";
- учащихся магистратуры по направлениям: 150700 "Машиностроение", осваивающих программу "Информационное обеспечение машиностроительного производства; 220100 "Системный анализ и управление", осваивающих программу "Системный анализ проектно-технологических решений";
- аспирантов, проводящих исследования в области оптимального проектирования и управления ТО.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.В37.21.0234 Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы".

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЁТАХ

Современный уровень создания технических систем требует от разработчика умения формулировать (ставить) задачу исследования и осуществлять разработку такой системы, которая отвечала бы высоким техническим показателям, должна быть экономически обоснована, конкурентоспособна на рынке аналогичной технической продукции.

Выполнение таких требований обязывает разработчика не только иметь быстродействующие системы исследования, разработки и выпуска технической системы, но и наличия двух-трёх, а может быть и более, вариантов аналогичного технического изделия, находящегося в различных стадиях разработки. Только в этом случае можно выдержать конкурентную борьбу на рынке.

Решение подобной задачи невозможно без использования современных достижений в области классической математики, математического моделирования, теории оптимального управления, системного анализа, современных информационных технологий и средств вычислительной техники.

Кроме этого, при создании (проектировании) технической системы необходимы знания фундаментальных основ процессов, протекающих в объёме исследования, в тех прикладных областях, для которых разрабатывается техническая система. Без ясного и чёткого понимания процессов, которые протекают в технической системе её создание невозможно. Кроме этого, разработка технической системы должна отвечать требованиям минимума материалоёмкости и энергозатрат, заданным требованиям эксплуатационных характеристик, включая техническое обслуживание, и, наконец, утилизацию после выработки заданного срока эксплуатации.

Сократить время исследования и разработки технических систем в настоящее время можно только одним способом – уходом в область протекания технологических процессов в технической системе, представленных в форме математических отношений и реализуемых (решаемых) на быстродействующих средствах вычислительной техники. Другими словами – если время протекания конкретного процесса в технической системе составляет часы, то решение уравнения, описывающего такой процесс на компьютере, составляет доли секунды, т.е. анализ и синтез технической системы может осуществляться в другом, более скоротечном и удобном для разработчика временном масштабе.

Однако при этом разработчик должен иметь значительно большую "научновооружённость" и в первую очередь это касается использования математических методов общего и специального назначения, о которых далее и пойдёт речь.

Анализ литературных источников позволяет сделать ряд выводов о некорректном применении классических и специальных математических методов при разработке и исследовании технических систем. В первую очередь это связано с неумением или нежеланием корректно осуществить постановку задачи исследования, а именно этот этап определяет, какие конструктивные и режимные характеристики объекта исследования подлежат определению, что является мерой оптимальности этих величин, какие процессы, протекающие в объекте исследования, необходимо учитывать, есть ли основания для описания таких процессов известными и проверенными зависимостями или есть необходимость изучения процессов на специальных лабораторных стендах, какие требования предъявляются к математической модели объекта исследования, которая в дальнейшем будет использоваться для поиска режимных и конструктивных характеристик объекта и т.д.

Естественно, что осуществить одномоментную постановку задачи чрезвычайно трудно, чаще всего невозможно. Поэтому процесс постановки является многоэтапным – от простейшего вербального до окончательно формализованного, когда исходная задача представлена в строгой математической форме, пригодной для её решения.

Зачастую в публикуемых работах предлагается математическая модель объекта исследования и не объясняется, для какой постановки задачи она пригодна, не уточняется область определения модели, её адекватность объекту исследования, а при тщательном анализе выявляется, что исследователь искажает понятие самого объекта исследования.

Если объект исследования (техническая система) достаточно сложен, то необходима декомпозиция поставленной задачи на систему взаимосвязанных задач, для которых также необходимы постановки задачи, выбор метода её решения и обоснование сходимости решения системы локальных задач к решению глобальной (исходной) задачи.

Современное состояние теории оптимального управления и средств вычислительной техники позволяет осуществлять постановку задач в экстремальной форме, что позволяет исследователю находить единственное, лучшее в смысле выбранного критерия оптимальности, решение.

Представление задачи исследования и проектирования технической системы в экстремальной форме позволяет получать минимальные затраты сырья, материалов на изготовление технической системы, энергетических ресурсов на её эксплуатацию, предельно точно обеспечивать выполнение технологического регламента при функционировании и обслуживании технической системы.

Подобный подход правомерен, если в конкретной прикладной области есть необходимый минимум знаний для построения математической модели объекта исследования для конкретной постановки задачи. Однако такая ситуация бывает далеко не всегда. Может быть так, что отдельные процессы в объекте исследования недостаточно изучены и не могут быть с требуемой для практики точностью формализованы, т.е. описаны в математической форме. При этом появляются специфические особенности постановки таких задач и методов их решения. В этом случае постановка задачи изменяется – в алгоритм её решения вводится лицо, принимающее решение (ЛПР), т.е. эксперт, который компенсирует отсутствие необходимых для решения задачи знаний. В этом случае мы говорим об интеллектуальной системе поддержки принятия решения. Получаемое при этом решение носит условно-оптимальный характер.

Далее будут рассмотрены этапы постановки и решения задач в технической сфере с использованием классических и специальных математических методов.

1.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Современное состояние разработки и исследования технических систем невозможно без использования классических и специальных математических методов. Суть применения математических методов заключается в упорядоченном использовании современных достижений в области системного анализа, математического моделирования, теории оптимального управления, методов решения уравнений математических моделей технических объектов, современных информационных технологий и средств вычислительной техники.

Принципы, на которых базируется применение математических методов при разработке и исследовании технических систем, заключаются в следующем:

- декомпозиция исходной задачи на систему взаимосвязанных задач с применением в дальнейшем методов системного анализа;
- применение методов математического моделирования для описания процессов в технических системах;
- применение теории оптимального управления и имитационного моделирования на завершающем этапе исследования;
- применение современного информационного обеспечения и средств вычислительной техники для реализации решения задач разработки и исследования технических систем.

Применение указанных выше принципов при разработке и исследовании технической системы в конкретной прикладной области даёт

возможность на современном уровне проводить как изучение поведения процессов в объекте исследования при различном его конструктивном оформлении, так и определять его оптимальные режимные и конструктивные характеристики.

1.1.1. Математическая постановка задачи исследования

Любое творческое начало в деятельности человека в любой сфере его деятельности должно начинаться с определения целей исследования и способов их достижения. Чем яснее и чётче исследователь ведёт себя на этом этапе, тем качественнее получаемые результаты и меньше вероятность получения неточных, а зачастую ошибочных результатов.

Цель исследования и способ её достижения формулируется в постановке задачи исследования. Очевидно, что одновременно сформулировать постановку задачи невозможно. Вначале постановка задачи формулируется в простейшем варианте, далее происходит уточнение различных факторов, определяющих решение задачи, анализ имеющихся статистических данных, принятие допущений и т.п.

Однако даже формулировка задачи в простейшей вербальной форме, требует от исследователя мобилизации всех знаний, используемых в дальнейшем для решения поставленной задачи. Словесная (вербальная) постановка задачи может звучать: *необходимо разработать техническую систему для реализации технологического регламента (системы технологических процессов) так, чтобы обеспечивались заданная производительность, качество производимой продукции, удобство эксплуатации, безопасность для окружающей среды и обслуживающего персонала, минимальные капитальные, эксплуатационные расходы и себестоимость получаемой продукции. При этом процесс исследования, проектирования, монтажа и выхода на проектную мощность не должен превышать заданных сроков.*

Так может формулироваться постановка задачи на её начальной стадии. Далее требуется уточнять, что представляет собой технологический процесс, который будет реализован в технической системе, насколько он отвечает тем знаниям в конкретной предметной области, на основании которых можно будет получить желаемые результаты, какие будут приняты допущения, в каком виде будут представлены конструктивные и режимные характеристики технической системы, обеспечивающие наилучшее протекание технологического процесса, в каких интервалах будет осуществляться поиск конструктивных и режимных характеристик технической системы, как будут оцениваться капитальные и эксплуатационные затраты, какие методы будут применяться при решении поставленной задачи и т.п.

Так, например, варьируемые (искомые) величины x_i обосновываются при постановке задачи. Из условий физической реализуемости они ограничиваются минимальными и максимальными значениями:

$$x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} .$$

Границы интервала задаются исследователем. Чем уже интервал $[x_{\min}, x_{\max}]$, тем проще найти оптимальное значение $x_i^{\text{опт}}$. Однако при уменьшении интервала может возникнуть следующая ситуация, когда $x_i^{\text{опт}} > x_{i\max}$ или $x_i^{\text{опт}} < x_{i\min}$, т.е. $x_i^{\text{опт}}$ будет находиться вне заданного исследователем интервала. В этом случае истинное значение $x_i^{\text{опт}}$

не будет найдено, а вместо него будет получена одна из границ интервала. Из приведённого выше примера ясно, насколько важна роль исследователя при задании границ применения искомых параметров.

Если рассматривать решение задачи проектирования "с конца", то завершающей стадией получения проектных решений будут средства вычислительной техники – компьютер. Представить информацию для компьютера можно только в строгой математической формулировке, т.е. задача должна быть формализована. Это формализованное математическое представление решаемой задачи и будет завершающим этапом постановки задачи, когда процесс сбора, анализа и представления информации завершён и можно начинать собственно вычислительные операции.

Этапу окончательной постановки задачи предшествует этап разработки математической модели объекта исследования, когда в соответствии с постановкой задачи осуществляется формализация процессов, протекающих в объекте с требуемой для практического использования точностью.

Последнее предопределяет адекватность математической модели исследуемому объекту в области её использования (определения) в соответствии с постановкой задачи.

Отсюда следует важный вывод – применение компьютера до окончательной постановки задачи в формализованном виде не требуется. Исключением является этап реализации метода решения уравнений математической модели и проверки её адекватности.

До окончательной постановки задачи действия исследователя должны быть сосредоточены на анализе постановки задачи исследования, обосновании искомых параметров объекта, допущениях, которые принимает исследователь, изучении процессов, протекающих в объекте, выборе метода их описания и на основании этого разработке адекватной модели объекта. На этих этапах исследователь должен максимально мобилизовать свои мыслительные способности и отдавать себе отчёт в том, что компьютер позволяет только ускорить процесс принятия решения по той программе, которую заложит в него исследователь.

Ещё один вывод, который можно сделать, заключается в том, что постановка задачи однозначно определяет структуру математической модели и область её определения. Другими словами, постановка задачи является техническим заданием на разработку математической модели объекта.

Иногда на этом этапе исследователю требуются дополнительные экспериментальные данные, дополнительные исследования, статистическая информация, которые на начальном этапе постановки задачи были неочевидны. Следует отметить, что большинство статистических данных есть не что иное, как результаты эксперимента на реальном, физически существующем объекте при определённых условиях проведения эксперимента. Процесс постановки задачи исследования завершается тогда, когда можно в окончательном варианте осуществить запись решаемой задачи в формализованном виде, т.е. в форме математических выражений.

Таким образом, постановка задачи исследования сводится к процедуре последовательного уточнения формулировки задачи до тех пор, пока задачу можно будет решать. Можно сделать вывод о целесообразности осуществлять постановку задачи в терминах теории оптимального управления, т.е. в терминах экстремальных задач. В этом случае научно-исследовательская задача в любой предметной области может быть сведена к следующей постановке: *необходимо найти такие варьируемые параметры, чтобы критерий оптимальности (зависящий от этих параметров) достигал своего экстремума (максимума или минимума) при ограничениях в форме равенств, неравенств и логических условий.*

Под выражением "равенства и неравенства" будем понимать совокупность уравнений (алгебраических, дифференциальных с обыкновенными или частными производными, интегральных, логических условий и т.п.), описывающих объект исследования при принятых исследователем допущениях, а также неравенств, ограничивающих интервально, как варьируемые переменные, так и ряд переменных, входящих в уравнения.

Логические условия используются тогда, когда по каким-либо причинам необходимо изменить стратегию моделирования или решения задачи.

Совокупность (система) уравнений, неравенств и логических условий позволяет получить математическую модель объекта исследования и область её определения, т.е. границы использования модели, в которых математическая модель описывает исследуемый объект с достаточной для практики точностью.

Наличие математической модели объекта позволяет осуществлять имитацию различных условий функционирования объекта, используя математические методы решения уравнений модели и средства современной вычислительной техники. При исследовании и проектировании

технических систем уравнения математических моделей, как правило, носят нелинейный характер, имеют высокую размерность, т.е. получение аналитического решения возможно только в простейших случаях. Чаще всего для решения уравнений математической модели используют различные модификации численных методов (методы Эйлера, Кунге-Кутта, разностные схемы).

Часто математическая модель в окончательной постановке задачи используется только для имитационного моделирования, задача оптимизации при этом не решается. Суть имитационного моделирования заключается в исследовании различных характеристик процессов, протекающих в объекте, с целью выявления новых или уточнения ряда известных характеристик, не нашедших до настоящего времени отражения в конкретной предметной области [1].

Применение методов математического моделирования исследуемых объектов позволяет существенно сократить время, за которое могут быть получены результаты математического моделирования по сравнению с физическим, так как процессы анализа ведутся в другом временном масштабе. И масштаб этот определяется быстродействием средств вычислительной техники.

Кроме того, математическое моделирование не требует экономических затрат на проведение экспериментальных исследований на реально существующем объекте.

Естественно, что такие рассуждения будут правомерны при условии, что математическая модель адекватна исследуемому объекту в рамках условий физической реализуемости (области применения математической модели) для конкретно поставленной задачи.

Следует также отметить, что применение математических методов и, в частности, метода математического моделирования требуют от исследователя большого объема знаний как о процессах, протекающих в объекте исследования, так и о собственно математических и инструментальных методах.

Таким образом, в границах области определения, используя математическую модель исследуемого объекта, можно осуществлять имитацию реальных процессов, протекающих в объекте, задавая при этом различные сочетания искомых величин.

Упорядочивание имитационных процессов осуществляется с помощью теории оптимального управления, когда ставится цель получения самого лучшего, оптимального решения поставленной задачи.

Суть применения оптимального управления заключается в следующем: с помощью математической модели исследователь вычисляет значение критерия оптимальности в некоторой, заранее заданной им точке пространства искомых величин, определяется направление движения к экстремуму критерия и в этом направлении делается рабочий

шаг, вычисляется новое значение критерия оптимальности, и процедура повторяется до достижения экстремального значения критерия. Таким образом, выполняется принцип оптимальности Беллмана: независимо от того, как Вы попали в данную точку пространства (искомых, исследуемых величин), дальнейшее движение должно осуществляться по оптимальной траектории.

Учитывая сказанное выше, структуру исследований с применением математических методов может представить блок-схемой (рис. 1.1).

Постановка задачи исследования является определяющим этапом в исследовании и, в частности, применении математических и инструментальных методов в исследованиях технического характера. Процесс реализации постановки задачи в соответствии с блок-схемой уточняется, обрастает деталями вплоть до завершения идентификации математической модели исследуемого объекта и проверки её адекватности. Следует отметить, что нередко в опубликованных исследованиях как раз такого раздела методологии применения математических методов и не хватает. Иногда только в конце проводимой работы удаётся осмыслить, что хотел сделать автор и насколько корректно он это делает.

Поэтому постановка задачи обязательна, многоэтапна, в значительной степени определяет все последующие действия, в частности, какая должна быть математическая модель объекта, какова её область определения, какие математические методы используются для решения уравнений модели, какие методы используются для поиска оптимального решения поставленной задачи, какие цели ставятся при имитационном моделировании.

Наиболее распространенная ошибка исследователя заключается в следующем: "предложена математическая модель...", и ни слова о том, для каких целей эта модель используется, какова её область определения, адекватна ли она объекту исследования и что из себя представляет этот объект, какие процессы в нём протекают, почему некоторые процессы не отражены в математической модели и т.п.

Совершенно ясно, что в такой ситуации какие-либо действия с использованием математического моделирования приводят, мягко выражаясь, к некорректным результатам, а часто и просто к ошибкам.

Ситуация применения математических методов осложняется тем, что все исследователи хотят быть на современном уровне использования как средств вычислительной техники и специализированных программных средств, так и собственно математических методов: теории математического моделирования, решения экстремальных задач, теории системного анализа. Если к этому добавить знания в прикладной области, то вырисовывается картина, которая не по силам каждому исследователю.

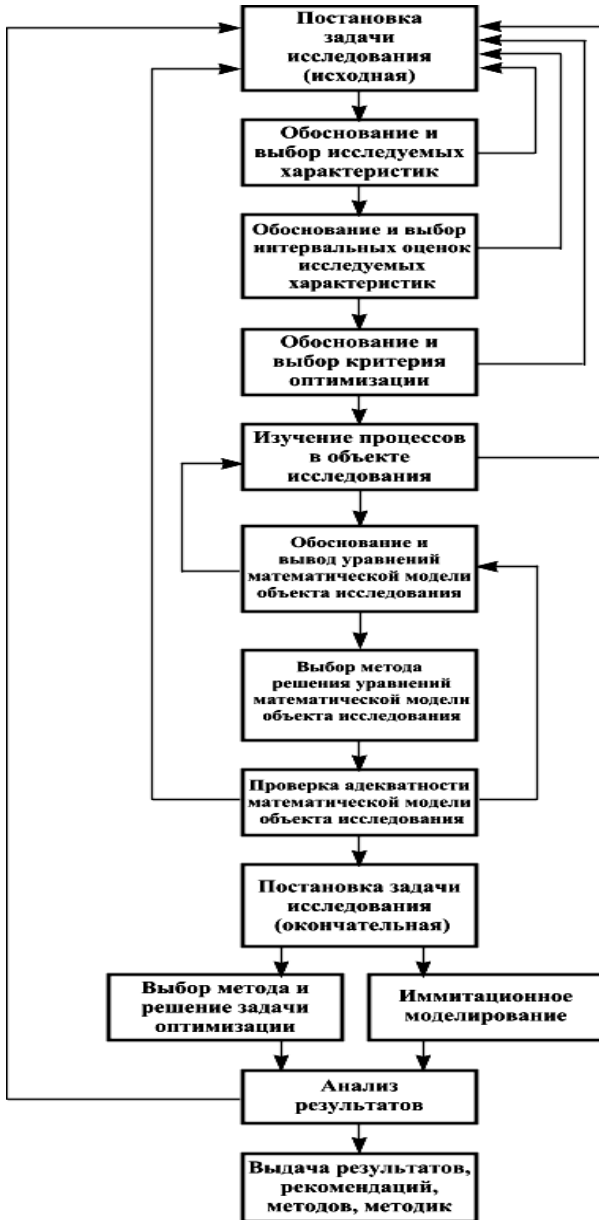


Рис. 1.1. Блок-схема исследований с применением математических методов

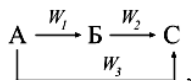


Рис. 1.2. Жизненный цикл формирования постановки задачи исследования

Введём понятие жизненного цикла формирования постановки задачи исследования. Жизненный цикл формирования постановки задачи исследования представлен в виде рис. 1.2.

Следование жизненному циклу формирования постановки задачи проектирования или/и управления технической системой позволяет целенаправленно следовать этапам постановки задачи, создавать адекватные математические модели, избегать ошибок и неточностей.

В качестве иллюстрации формирования постановки задачи исследования приведём оценку теоретически возможного выхода целевого продукта в трубчатом реакторе с последовательно-параллельным кинетическим механизмом:



где А, В, С – реагенты; W_1, W_2, W_3 – скорости химических реакций по маршрутам кинетического механизма; А – сырьё; С – побочный продукт; В – целевой продукт.

Вербальная постановка рассматриваемой задачи имеет следующий вид:

- для заданного кинетического механизма необходимо найти максимальный, теоретически возможный выход целевого продукта в трубчатом реакторе.

Формализованная постановка задачи будет выглядеть так:

- необходимо найти такие $C_{A0}, G, T(l), L, d$, что критерий оптимальности $C_B(L)[C_{A0}, G, T(l), L, d]$ достигает максимума при выполнении условий:

$$\begin{aligned} \frac{dC_A(l)}{dl} &= -\frac{SF}{G}(W_1 + W_3); \\ \frac{dC_B(l)}{dl} &= \frac{SF}{G}(W_1 - W_2); \\ C_A(0) &= C_{A0}; \quad C_B(0) = 0; \quad 0 \leq l \leq L; \\ T_{\min} &\leq T(l) \leq T_{\max}; \quad C_{A0\min} \leq C_{A0} \leq C_{A0\max}; \\ G_{\min} &\leq G \leq G_{\max}; \quad d \in \{d_n\}, \quad n = \overline{1, m}; \\ W_1 &= K_1 \frac{C_B^v}{1 + bC_A^c}; \quad W_2 = K_2 C_A; \quad W_3 = K_3 \frac{C_B^\gamma}{1 + bC_A^c}; \\ K_i &= K_{i0} \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right), \quad i = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

где C_A, C_B – концентрация сырья и целевого продукта; W_1, W_2, W_3 – скорости химических реакций, $i = \overline{1, 3}$; L – длина реакционной зоны; d – диаметр трубки; S – удельная поверхность катализатора; F – площадь поперечного сечения трубки; G – расход сырья; T – температура; c, γ, v – стехиометрические коэффициенты; K_{i0} – предэкспоненциальный множитель; E_i – энергия активации i -й реакции; R – универсальная газовая постоянная; b – константа.

Система (1.1) – математическая модель трубчатого реактора для постановки задачи поиска максимального, теоретически возможного выхода целевого продукта в трубчатом реакторе.

Рассмотренная задача является вариационной задачей, так как в число аргументов критерия оптимизации входит функция – зависимость температуры от длины реакционной зоны $T(l)$.

Ранее были рассмотрены различные постановки этапов проектирования трубчатого реактора и методы их решения [2].

1.2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка и решение достаточно сложных задач исследования и проектирования технической системы осуществляется с применением метода декомпозиции и использования в дальнейшем методологии системного анализа.

Процесс декомпозиции основан на разделении исходной (глобальной) задачи исследования на множество взаимосвязанных локальных задач, совместное решение которых должно обеспечивать экстремальное значение критерия оптимальности глобальной задачи.

Декомпозиция глобальной задачи целиком зависит от исследователя, основывается на опыте предшественников, функциональной завершённости, получаемых в результате декомпозиции задач, наличия исполнителей и ряда других факторов.

При декомпозиции не следует "мельчить", каждая локальная задача должна быть логически обоснована и на стадии решения каждой задачи результат должен быть функционально обоснованным. Например, при декомпозиции задачи проектирования ёмкостного аппарата целесообразно выделить следующие локальные задачи: расчёт рабочего объёма аппарата; расчёт теплообменных устройств; расчёт перемешивающего устройства, привода: прочностные расчёты элементов аппарата и т.п.

При этом каждая из рассмотренных задач может быть поставлена как экстремальная, однако на входе каждой задачи будет фиксированный сигнал (сигналы), значение которого нужно будет всегда учитывать при решении экстремальной задачи. Этот сигнал передаёт информацию о том, что решаемая задача является зависимой от других задач системы. Наиболее наглядно этот факт просматривается в системе задач, получаемых после декомпозиции, когда её результат представлен в виде иерархической многоуровневой системы.

Рассмотрим задачу проектирования ёмкостного аппарата с перемешивающим устройством. Так, на рисунке 1.3 стрелкой вверх \uparrow обозначается информационный сигнал, который содержит результаты решения задач нижнего уровня. Стрелка вниз \downarrow обозначает координирующий сигнал, который вырабатывается на верхнем уровне для каждой из задач нижнего уровня.

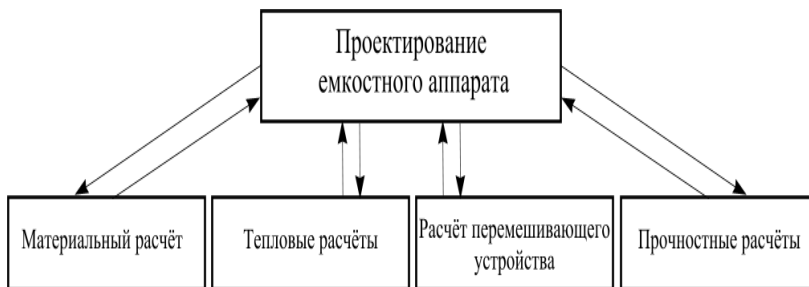


Рис. 1.3. Иерархия проведения расчётных работ при проектировании ёмкостного аппарата

Задачи нижнего уровня непосредственно между собой не связаны. "Увязка" результатов решения задач нижнего уровня как раз и осуществляется заданием координирующих сигналов, величина которых выбирается на верхнем уровне, исходя из экстремума критерия оптимальности глобальной задачи. Итерационный процесс решения задач нижнего уровня и вычисления значения глобального критерия на верхнем уровне завершается, когда на двух соседних итерациях результаты решения задач нижнего уровня не будут отличаться друг от друга на небольшую положительную, заранее заданную величину, называемую точностью проведения расчёта [3].

Часто декомпозицию приходится уточнять, "укрупняя" или наоборот "уменьшая" локальные задачи системы. Во всех ситуациях эти функции лежат на исследователе (проектировщике), который выполняет роль системного аналитика.

Результаты декомпозиции задачи создания многоассортиментного малотоннажного производства красителей, полупродуктов, добавок к полимерным материалам, синтетических душистых веществ, лекарственных препаратов и тому подобных приведён на рис. 1.4.

Следует отметить, что правомерность декомпозиции не может быть получена путём строгого доказательства. Доказательством правомерности принятой декомпозиции является получение согласованных между собой решений локальных задач системы, обеспечивающих экстремальное значение глобального критерия оптимизации.

Совершенно не обязательно, что все локальные задачи системы, получаемой после декомпозиции, будут поставлены в форме экстремальных задач.

Ещё раз подчёркивая, что декомпозиция полностью определяется исследователем, можно предположить о наличии задач, которые при подаче на её вход исходных данных однозначно выдают конечный результат.

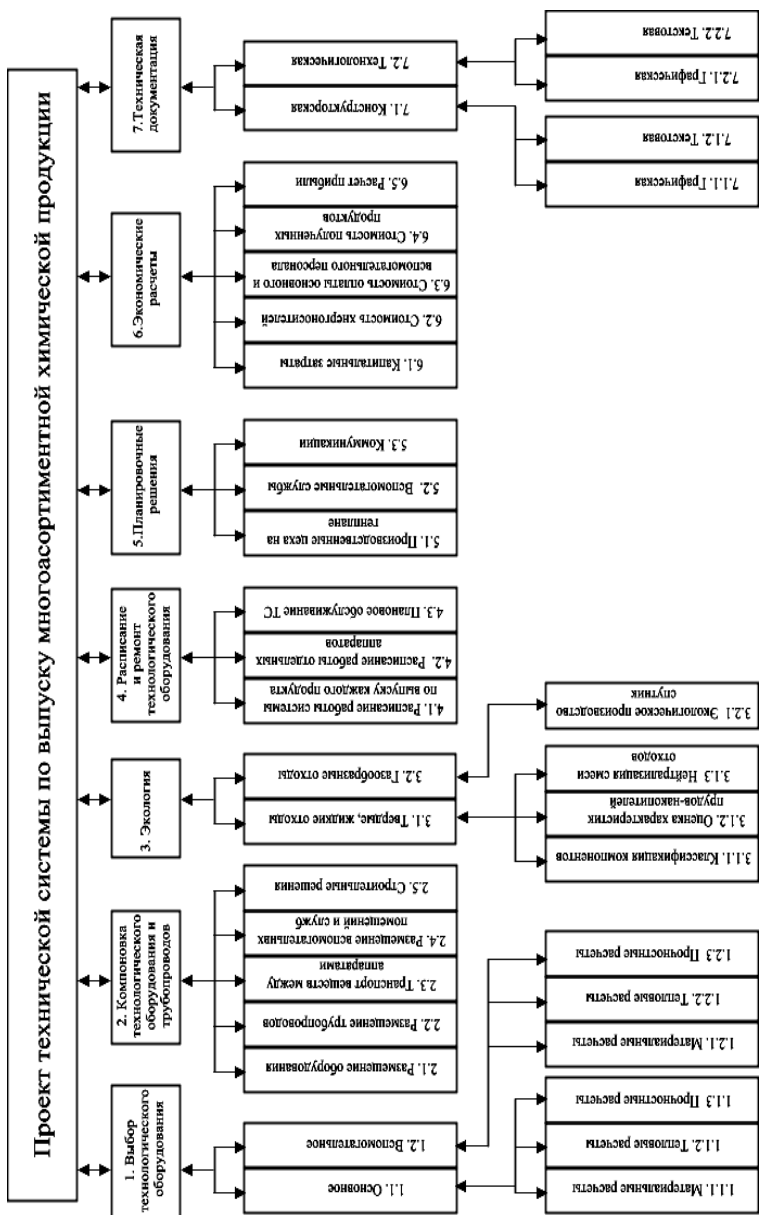


Рис. 1.4. Иерархическая многоуровневая система проектирования (исследования) многоассортиментных химических производств

Так же не обязательно получать после декомпозиции систему задач в виде многоуровневой иерархической системы. Система задач может быть представлена в форме блок-схемы. В качестве примера можно привести блок-схему на рис. 1.1.

Таким образом, после декомпозиции глобальной задачи, исследователь получает систему взаимосвязанных локальных задач, для каждой из которых нужно определить искомые параметры, интервальные оценки их применения, построить математическую модель локального объекта исследования, адекватную этому объекту, осуществить формализованную постановку задачи исследования, выбрать метод и осуществить её решение.

1.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1.3.1. Основные положения

Этому разделу предшествует постановка задачи исследования объекта, анализ входных и выходных координат и их интервальных оценок, а также методика оценки численных значений выходных координат.

Итак, исследователю известно, какие входные координаты объекта исследования он будет изменять (варьировать) и в каких пределах, а также какие выходные координаты будут зависеть от изменения входных.

Кроме этого исследователю известно, как он будет оценивать интересующую его по постановке задачи исследования совокупность выходных координат численно, используя критерий оптимальности.

Рассмотрим более подробно этап построения математической модели объекта исследования.

Для проведения исследований на объекте необходимо установить связь между входом и выходом объекта, т.е.

$$\bar{y} = F(\bar{x}),$$

где $\bar{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $\bar{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ – множество входных, выходных координат объекта исследования и множество операторов, отображающих входную величину объекта в выходную, соответственно; $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, $q = \overline{1, k}$; n, m, k – число выходных, входных координат объекта и операторов, связывающих эти координаты.

Функционально это можно представить в виде рис. 1.5.

Следует отметить, что входные, выходные координаты объекта исследователь выбирает сам, следуя постановке задачи исследования.

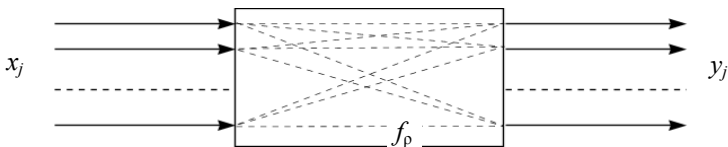


Рис. 1.5. Математическая модель объекта

Он же устанавливает способ вычисления выходных координат по входным в зависимости от природы протекающих в объекте исследовании процессов, т.е. от вида оператора F . При этом возможны следующие ситуации:

- объект исследования существует физически с рабочими размерами;
- объект исследования существует физически с уменьшенными размерами;
- объект исследования заменяется совокупностью формализованных описаний процессов, протекающих в объекте, в форме математических выражений.

Таким образом, в первых двух подходах осуществляется физическое моделирование различных ситуаций на реальном объекте или его уменьшенной физической модели, а в третьем – исследование осуществляется по математической модели путём изменения начальных условий уравнений модели, коэффициентов уравнений, вида уравнений и т.д.

В общем случае оператор F может иметь вид алгебраических, дифференциальных, интегральных математических форм, быть непрерывным, принимать дискретные значения, быть кусочно-постоянным, логическим и т.п. Вид, структура, коэффициенты оператора F полностью определяются, с одной стороны, глубиной проработки процессов, протекающих в объекте исследования; с другой, – постановкой задачи исследования, когда исследователь, принимая те или иные допущения, решает, насколько точно нужно описывать каждый процесс и нужно ли его учитывать вообще.

Применительно к химической технологии при построении математической модели технологического оборудования, такие допущения как режимы идеального вытеснения или смешения, турбулентность или ламинарность потоков, отсутствие фазовых переходов, кинетическая или диффузионная область протекания процессов и другие, коренным образом меняют вид математической модели объекта. Обоснованность принятых допущений упрощает математическую модель, не искажая постановку задачи исследования.

Все три подхода к формированию оператора F объединяет следующий факт – поведение объекта в задаваемых исследователем интервалах изменения входных величин должно с заданной для постав-

ленной задачи точно осуществлять воспроизведение выходных координат. В этом случае оператор F будет адекватен исследуемому объекту с приемлемой точностью для конкретно поставленной задачи и будет являться модельным представлением объекта исследования.

Из сказанного выше следует вывод – моделирование объекта исследования осуществляется в двух направлениях: физическое моделирование и математическое.

При физическом моделировании осуществляется воспроизведение объекта исследования в полной мере (первый подход формирования оператора F) или на "уменьшенной" подобной модели (второй подход формирования оператора F). Оба подхода наглядны, характеризуются достаточной точностью воспроизведения объекта исследования, однако при втором подходе требуется доказательство подобия модели и объекта в рамках поставленной задачи. Физическое моделирование достаточно затратно, так как требуется выполнение всех нормативов, отнесённых к реальным объектам – затраты материалов, сырья, энергии, обслуживание и ремонт, выполнение правил техники безопасности и т.п.

Особо следует подчеркнуть, что протекание процессов в физических моделях осуществляется в том же временном масштабе, как и процессы в реальном объекте исследования.

Основной отличительной чертой математического моделирования является перевод моделируемых в объекте исследования процессов в другое временное пространство, где скорость протекания реальных процессов в объекте исследования соизмерима со скоростью решения математических форм (уравнений, неравенств, логических условий и т.п.), составляющих математическую модель объекта.

Следует отметить, что при математическом моделировании объектов исследования так же, как и при втором подходе к формированию оператора F , требуется специальное доказательство (адекватность, область определения математической модели) правомерности такого подхода.

Уход в другое временное пространство и, как следствие, получение значительного количества "свободного" времени, которое исследователь использует для анализа различных ситуаций по режимному и конструктивному оформлению протекания процессов в технической системе является основным достоинством метода математического моделирования. Кроме этого, применение математического моделирования не требует материальных, сырьевых, энергетических затрат, как это бывает при реализации (физическом моделировании) процессов в объекте исследования.

И вот тут встаёт вопрос – если всё так хорошо при реализации метода математического моделирования, почему этот метод применя-

ется в полной мере не так уж часто, почему при применении этого метода выявляется множество некорректных действий исследователя и почему результаты, получаемые с "благими" намерениями, зачастую являются ошибочными.

И выясняется следующая ситуация. Ответ на перечисленные выше вопросы прост и однозначен – у исследователя нет необходимых для применения метода математического моделирования знаний (всех или части). Ситуация осложняется ещё и тем, что глубина проработки кинетических закономерностей процессов в объекте исследования в конкретной прикладной области для конкретной постановки задачи может быть недостаточной или отсутствовать вообще. В этом случае этап построения математической модели объекта совмещается с изучением (уточнением) кинетических закономерностей процессов, протекающих в объекте – кинетического механизма, выражений для скоростей протекания процессов по маршрутам кинетического механизма, в которые в явной форме входят режимные и конструктивные характеристики исследуемой (проектируемой) технической системы. В идеале в кинетические уравнения должны входить только режимные характеристики. Примером тому может служить химия, где в соответствии с законом действующих масс и уравнением Аррениуса скорость химической реакции зависит только от температуры и концентрации реагентов и инвариантна к конструкции технологического оборудования.

В ряде других прикладных областей оценку кинетических процессов, протекающих в объекте исследования, осуществляют на экспериментальных установках с фиксированными конструктивными характеристиками, которые в явной или неявной форме входят в кинетические уравнения. Естественно, что такие кинетические выражения сужают область определения разрабатываемой математической модели и должны чётко отслеживаться исследователем.

Следует отметить, что процесс построения математической модели объекта исследования наиболее трудоёмок и ответственен при исследовании и проектировании технических систем. Именно на этом этапе исследователем допускаются просчёты, которые могут существенно исказить искомые характеристики технической системы.

Построение математической модели начинается с анализа процессов, протекающих в объекте исследования (проектирования). А прежде чем анализировать процессы, нужно установить, что из себя представляет объект исследования. Применительно к химической технологии в качестве объектов исследования и проектирования можно выделить химико-технологическую систему (ХТС) – совокупность стадий, аппаратов, маршрутов передачи веществ между аппаратами; пространственное размещение аппаратов, трубопроводов, средств транспортировки веществ между аппаратами ХТС, вспомогательных

служб в производственном помещении; размещение цехов и коммуникаций на генплане предприятия; расписание работы технологического оборудования с учётом графика планово-предупредительных ремонтов и др. Будем в дальнейшем такие объекты называть макрообъектами, а их математические модели – макромоделями. В отличие от макромоделей в химической технологии микромодели описывают (моделируют) поля определяющих параметров технологического оборудования, т.е. распределения температур, концентраций, давлений, скоростей, напряжений по пространственным координатам рабочих зон, узлов, отдельных элементов оборудования и во времени.

При разработке микромоделей объектов химической технологии описание процессов, протекающих в объекте, осуществляется с использованием кинетических закономерностей, которые отражены для химических превращений в законе действующих масс и законе Аррениуса, теплопередачи в уравнении Фурье-Кирхгофа, движении сред в уравнении Навье-Стокса, распределении нагрузок на элементах оборудования в законе Пуассона и т.д.

Подобная классификация объектов химической технологии и соответствующим им математическим моделям целесообразна, так как в каждом классе есть свои специфические особенности. Так полноценная микромодель для объектов химической технологии представляется в виде нестационарной системы уравнений в частных производных, решение которой может иметь серьёзные трудности. При принятии обоснованных по постановке задачи допущений микромодель объекта исследования может быть сведена к стационарному виду, частные производные заменятся обыкновенными, а в некоторых случаях микромодель будет представлена даже в виде системы алгебраических уравнений.

Микрообъекты химической технологии – это оборудование ХТС, расчёт конструктивных и режимных характеристик, в которых ведётся с использованием кинетики химических превращений, массо- и теплообмена, гидродинамики движения сред, нагруженности элементов оборудования. Перечисленные выше расчёты ведутся для отдельно взятого аппарата ХТС, исходя из постановок конкретных задач для данного вида оборудования. При этом находятся все режимные и все конструктивные параметры аппарата, кроме определяющего геометрического размера – рабочей поверхности или рабочего объёма (в зависимости от типа аппарата).

А нахождение определяющих геометрических размеров аппаратов, входящих в ХТС, осуществляется при решении макрозадачи – выборе основного технологического оборудования (рис. 1.4). При решении этой задачи кроме определяющих геометрических размеров находятся число стадий ХТС, число аппаратов на каждой стадии, раз-

мер партии продукта и время её обработки на каждой стадии, время выпуска каждого вида продукции (для многоассортиментных производств) и ряд других характеристик.

Таким образом, благодаря введённой классификации исследователь (проектировщик, конструктор) имеет дело с двумя видами технологических систем – макро- и микросистемами.

В микросистему входит отдельно взятый аппарат с протекающими в нём процессами и элементы аппарата – узлы, детали. В макросистему входят совокупности технологических аппаратов, технологических коммуникаций, совокупность основных производственных единиц (цехов) и вспомогательных (склады, внешние магистрали, службы отопления, освещения, вентиляции, контрольно-измерительной техники и т.п.). В макросистеме протекают свои, свойственные конкретному макрообъекту макропроцессы, без знания которых невозможно определить оптимальные конструктивные и режимные характеристики таких систем.

Если в микросистемах понятие процессов, протекающих в объекте исследования (проектирования, конструирования) и их микрокинетических закономерностей является достаточно устоявшимися, то в макросистемах химико-технологического профиля подобные представления являются нечёткими, а зачастую просто отсутствуют.

Отсюда некорректные постановки задач разработки таких макросистем, некорректные математические модели, исследование которых приводит к некорректным, а иногда и ошибочным результатам, достаточно вольная, плохо обоснованная терминология.

Из сказанного выше следует вывод: разработка технической системы в любой прикладной области (для нас – химическая технология) сводится к поиску режимных и конструктивных характеристик объекта исследования (проектирования, конструирования) на основании анализа протекающих в объекте процессов, описание которых осуществляется на основе их кинетических закономерностей. И это не зависит от того, является ли техническая система микро- или макросистемой. Конкретный набор режимных и конструктивных характеристик технической системы определяется постановкой задачи. Постановка задачи определяет объект исследования и его математическую модель, адекватную объекту в области определения, устанавливаемой опять же постановкой задачи исследования (проектирования, конструирования).

Если проектировщик (конструктор, исследователь) будет придерживаться такой методологии и применять современные достижения в области теории оптимального управления, системного анализа, математического моделирования, информационных технологий и средств вычислительной техники, то успех ему гарантирован (при условии, что он обладает такими знаниями).

Теперь рассмотрим ситуацию, когда поставленная (в вербальной форме) задача трудно решается и её нужно декомпозировать на систему взаимосвязанных локальных задач. В этом случае исследователь ограничивается тем, что исходный объект исследования заменяется системой локальных объектов (в соответствии с проведённой декомпозицией), формирует критерий оптимальности исходной (глобальной) задачи и приступает к постановке локальных задач и дальнейшим действиям в соответствии с изложенной выше методикой до того момента, как будут окончательно поставлены все локальные задачи полученной системы и появится возможность приступить как к непосредственному решению локальных задач, так и согласованию этих решений, доставляющее экстремум критерию оптимальности глобальной задачи. Методы решения локальных задач, поставленных в экстремальной форме и вопросы согласования этих решений будут рассмотрены ниже, а пока вернёмся к вопросам построения математических моделей объектов исследования.

1.3.2. Методы построения математических моделей объектов исследования и проектирования

Из приведённых выше рассуждений следуют два вывода – математическая модель объекта должна строго соответствовать постановке задачи исследования и основой математической модели являются процессы, протекающие в объекте и представленные в виде формализованных кинетических характеристик.

Рассмотрим методы построения математических моделей объектов исследования. В зависимости от постановки задачи исследования в математической модели могут быть представлены все процессы, протекающие в объекте (случай 1), часть процессов (случай 2) и ни одного процесса (случай 3).

В первый момент такое предположение может показаться странным. Рассмотрим эту ситуацию подробно.

Учёт всех процессов, протекающих в объекте (имеются в виду процессы, существенно влияющие на свойства объекта) необходим при решении задачи проектирования технической системы. Чем полнее будут описаны значимые для определения конструктивных и режимных характеристик объекта процессы, тем точнее будет результат проектных работ. В то же время, при постановке задачи проектирования может возникнуть ситуация, когда предусмотрено применение типового, серийно выпускаемого оборудования. В этом случае конструктивные характеристики будут фиксированы, а определению подлежат только режимные характеристики, что приведёт к упрощению математической модели.

Может также быть и такая ситуация, когда некоторые процессы в объекте не исследованы и не могут быть описаны в модели объекта.

И, наконец, может быть такая ситуация, когда исследователя не интересуют процессы, протекающие в объекте. Говорят, что в этом случае объект представляет собой "чёрный ящик" и исследователя интересует формальное поведение объекта, не требующее знания протекающих в нём процессов.

Такие проблемы возникают при оценке инерционности объекта или времени и характера перехода из одного статического состояния в другое. Подобная необходимость возникает при разработке систем управления технической системой. В этом случае, независимо от природы протекающих в объекте процессов, объект представляется в виде звена чистого запаздывания, интегрирующего, дифференцирующего, пропорционального или аperiodического звена первого или второго порядка или сочетания таких звеньев.

Существуют три метода построения математических моделей технической системы: экспериментальный, аналитический и экспериментально-аналитический (ЭАМ) [4].

Суть экспериментального метода заключается в следующем. На вход объекта исследования подаётся известный испытателю сигнал и фиксируется поведение выходной координаты объекта. При снятии динамических характеристик объекта рассматривается временной промежуток от подачи испытательного сигнала до установившегося значения выходной координаты и характер изменения выходной координаты во времени. Статические характеристики объекта соответствуют параметрам: вход-выход при установившемся значении выходной координаты.

Результаты эксперимента представляются в виде таблиц или непрерывных зависимостей выходной координаты объекта. Аппроксимация экспериментальных значений осуществляется любой, наиболее пригодной для дальнейшего применения математической формой.

В качестве примера можно привести полиномиальную зависимость изменения выходной координаты объекта во времени:

$$y(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i, \quad i = \overline{0, n}. \quad (1.2)$$

Коэффициенты a_i находятся из условия:

- при

$$x^p(t) \equiv x^3(t), \quad |y^3(t) - y^p(t)| \leq \delta,$$

где $x^p(t)$, $x^3(t)$ – расчётное и экспериментальное значения входной координаты объекта; $y^p(t)$, $y^3(t)$ – экспериментальное и полученное по аппроксимирующей форме значения выходной координаты объекта; δ – точность.

Координаты a_i не имеют физического смысла и аппроксимирующее выражение (1.2) формально описывает реакцию объекта на испытательный сигнал. Метод прост, имеет высокую точность описания объекта, однако область применения таких моделей ограничена. Очевидно, что полученная математическая модель объекта не может быть использована для целей проектирования.

Аналитический метод построения математической модели объекта предусматривает описание процессов, протекающих в объекте, в форме кинетических зависимостей, вытекающих из фундаментальных законов, описывающих эти процессы. Коэффициенты уравнений математической модели, полученной аналитическим методом, имеют чёткий физический смысл и находятся из справочной литературы.

Применение аналитического метода затруднительно, если процессы в объекте плохо изучены. Неучёт таких процессов в математической модели приводит к низкой точности получаемых результатов, а иногда модель объекта исследования и вообще нельзя получить.

Однако если аналитический метод построения математических моделей применим, т.е. знания о процессах, протекающих в объекте, достаточны для его применения, то получаемая математическая модель объекта наиболее пригодна для определения конструктивных и режимных характеристик объекта, т.е. для целей проектирования.

Компромиссом между аналитическим и экспериментальным методом является экспериментально-аналитический метод (ЭАМ), суть которого заключается в следующем. В соответствии с постановкой задачи все хорошо изученные процессы, протекающие в объекте, представлены в виде формализованных математических зависимостей. Этот этап применения ЭАМ аналогичен аналитическому методу.

На втором этапе применения ЭАМ осуществляется уточнение параметров уравнений модели, полученных на первом этапе, по результатам эксперимента на реальном объекте. Определение (уточнение) коэффициентов уравнений модели осуществляется из условия:

- при

$$x^p \equiv x^3, \quad \left| y^3(x^3) - y^p(x^p, a_i) \right| \leq \delta, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1.3)$$

где x^p, x^3 – расчётное и экспериментальное значение входной координаты объекта; $y^3(x^3), y^p(x^p, a_i)$ – значения выходной координаты объекта, полученные в результате эксперимента и рассчитанные по математической модели объекта; n – число коэффициентов уравнений математической модели; δ – заданная точность.

В качестве начальных приближений при определении a_i служат истинные значения коэффициентов, полученных аналогично аналитическому методу из справочной литературы. Значения a_i , найденные из условия (1.3), могут существенно отличаться от известных в литературе значений. Подобное расхождение как раз и компенсирует то отсутствие знаний о процессах, протекающих в объекте исследования, которые были неизвестны исследователю при осуществлении первого этапа применения ЭАМ.

Таким образом, математическая модель объекта исследования, полученная с использованием ЭАМ, включает в себя описание всех процессов, известных исследователю и необходимых по постановке задачи. Степень "незнания" части процессов уточняется определением коэффициентов уравнений математической модели. ЭАМ обладает достаточно высокой точностью воспроизведения процессов в объекте исследования, но область определения математических моделей, полученных этим методом, ограничивается теми однотипными объектами, на которых был проведён эксперимент. Очевидно, что и для целей проектирования модели, полученные ЭАМ, имеют ограниченное применение.

Подводя итог описания методов построения математических моделей объекта исследования, следует сказать, что экспериментальный метод, обладая высокой точностью описания поведения объекта, имеет узкую область применения, ограниченную решением задач определения параметров систем управления. Экспериментально-аналитический метод позволяет учитывать ту часть свойств объекта, которая хорошо изучена, имеет достаточно высокую точность их описания, однако пригоден только для узкого класса однотипных объектов, на которых проводится эксперимент по определению коэффициентов уравнений модели.

Аналитический метод требует для своего применения знаний о всех процессах, протекающих в объекте в соответствии с постановкой задачи. Незнание каких-либо процессов или отдельных параметров уравнений, описывающих эти процессы, ведёт к потере точности. Однако именно этот метод построения математических моделей наилучшим образом подходит для целей проектирования или исследований влияния конструктивных и режимных характеристик объекта на поведение технической системы.

1.3.3. Решение уравнений модели. Адекватность модели

Математическая модель будет окончательно разработана только после того, как будет выбран метод решения уравнений модели и доказана её адекватность объекту исследования.

В зависимости от того, что из себя представляет объект исследования и какова постановка задачи уравнения математической модели, могут быть системой алгебраических, дифференциальных с обыкновенными или частными производными интегральных уравнений, системой логических условий в форме булевой алгебры и тому подобных, быть линейными или нелинейными, иметь высокую размерность, быть представленными в форме задачи Коши или краевой задачи. Словом, набор математических форм чрезвычайно разнообразен. И, несмотря на это, есть один показатель, общий почти для всех форм моделирования технических объектов – аналитическое решение систем уравнений математической модели возможно только в простейших случаях.

Аналитическое решение может быть получено для систем линейных алгебраических уравнений невысокой размерности, дифференциальных уравнений с обыкновенными производными, опять же линейных, чаще – однородных с постоянными коэффициентами [5].

В остальных случаях используются численные методы с применением средств вычислительной техники. Так для решения достаточно сложных систем алгебраических уравнений используется метод Гаусса [5], для систем дифференциальных уравнений с обыкновенными производными – численные методы Эйлера, Рунге-Кутты, Адамса [5, 6]. Для решения уравнений с частными производными – различные модификации явных и неявных сеточных методов, например, метод Кранка-Никольсона [6] и т.д.

Как правило, исследователям крайне редко приходится разрабатывать собственные программные продукты для решения уравнений математических моделей. Существуют стандартные программные продукты ведущих мировых фирм, предлагающие хорошо отработанные программно-математические комплексы для решения различных видов систем нелинейных уравнений высокой размерности. Так что неразрешимые проблемы в этом плане у исследователя могут возникнуть крайне редко. С учётом последнего можно считать, что исследователь всегда может подобрать стандартный метод решения уравнений математической модели объекта исследования.

И вот здесь стоит задать вопрос: "А можно ли называть математической моделью ту систему уравнений, которую создал исследователь для конкретной постановки задачи, выбрал метод решения уравнений модели и довел его до практической реализации?"

Строго говоря, несмотря на то, что модель "заработала", её можно называть только гипотетической математической моделью объекта исследования. А освободиться от названия "гипотетической" можно только после того, как будет доказано, что математическая модель в

области её определения адекватна объекту моделирования. Другими словами, – математическая модель пригодна для решения поставленной задачи. И ещё более точная формулировка: для любых сочетаний режимных и конструктивных характеристик проектируемого (исследуемого) объекта, математическая модель должна воспроизводить поведение реального объекта с заданной точностью для конкретной постановки задачи. А "любые сочетания" конструктивных и режимных характеристик объекта определяются интервальными оценками, которые задаются исследователем для каждого искомого параметра.

Остановимся подробнее на том, что нужно сделать, чтобы доказать адекватность математической модели в области её определения по постановке задачи реальному объекту.

Для математических моделей, построенных экспериментальным или экспериментально-аналитическим методами, проверка адекватности осуществляется следующим образом:

- при

$$x_i^p \equiv x_i^э, \quad \frac{\sum_{i=1}^n |y_i^э - y_i^p|}{n} \leq \delta, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1.4)$$

где $x_i^p, x_i^э$ – расчётное и экспериментальное значение входной координаты объекта в i -м эксперименте; $y_i^p, y_i^э$ – расчётное по модели и экспериментальное значение выходной координаты объекта в i -м эксперименте; n – число экспериментов.

Используемые для проверки адекватности математической модели экспериментальные данные не должны совпадать с экспериментальными данными, применяемыми ранее для определения коэффициентов уравнений математической модели.

Таким образом, проверка адекватности математических моделей, построенных по экспериментальному и экспериментально-аналитическому методам, осуществляется на основании сравнения результатов независимых экспериментов с аналогичными результатами, полученными по математической модели.

Иначе обстоит вопрос о проверке адекватности при использовании для разработки модели аналитического метода. Отсутствие реального объекта не позволяет провести экспериментальную проверку. Адекватность модели оценивается по косвенным показателям – достоверности фундаментальных законов, описывающих протекание отдельных процессов в объекте исследования, использовании проверенных ранее зависимостей, значений констант и т.п.

Проверка адекватности и установление факта соответствия области определения математической модели постановке задачи исследования (проектирования) являются завершающим этапом постановки задачи. Теперь, когда в соответствии с постановкой задачи установлены параметры объекта (конструктивные и режимные характеристики), подлежащие определению, заданы интервальные оценки их изменения, получена математическая модель объекта, имитирующая его поведение с заданной точностью, выбран критерий оптимизации искомым характеристикам объекта, остаётся только выбрать метод решения экстремальной задачи и осуществить его реализацию.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие математические методы используются для проектирования технических систем?
2. Что такое вербальная постановка задачи проектирования?
3. Что такое формализованная постановка задачи проектирования?
4. Декомпозиция глобальной задачи проектирования.
5. Роль системного анализа в проектировании технических объектов?
6. Методы построения математических моделей объектов проектирования.
7. Проверка адекватности математических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. *Шеннон, Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М. : МИР, 1978. – 421 с.
2. *Немтинов, В. А.* Информационные технологии при проектировании и управлении техническими системами. Ч. 2 / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб и др. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО "ТГТУ", 2011. – 159 с.
3. *Месарович, М.* Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : МИР, 1973.
4. *Балакирев, В. С.* Оптимальное управление химической технологии / В. С. Балакирев, В. М. Володин, А. М. Цирлин. – М. : Химия, 1978. – 412 с.
5. *Корн, Г.* Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1978. – 831 с.
6. Самарский, А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука, 1989. – 427 с.

РЕШЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Исследователями накоплен большой опыт построения аналитических математических моделей технологических процессов [1]. Опыт основан на глубоком теоретическом анализе физических и химических процессов, происходящих в исследуемом объекте. При выводе уравнений аналитических математических моделей используются фундаментальные законы сохранения вещества и энергии, а также кинетические закономерности процессов переноса массы и теплоты, химических превращений. Всё это даёт возможность таким моделям адекватно описывать технологические процессы в широком диапазоне действия входных и управляющих воздействий.

Наряду с существенными преимуществами аналитические математические модели имеют недостатки, связанные с невозможностью определения точных значений некоторых их параметров. Далее такие параметры будем называть неопределёнными и обозначать в виде вектора $v = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_p)$, $v \in R^p$, где R^p – евклидово пространство размерностью p . Чаще всего к неопределённым параметрам, например, для технологических процессов химической технологии, относятся физико-химические константы, коэффициенты тепло- и массоотдачи, теплопроводности, скорости химических реакций, а также концентрации веществ во входных потоках и др. Неопределёнными параметрами математических моделей могут являться и конструктивные характеристики оборудования, например, площадь поверхности теплообмена, внутренний объём реакционной камеры и др.

Известно несколько подходов к раскрытию неопределённостей. Широко используется вероятностный подход [2], в котором неопределённые параметры v_i , $i = \overline{1, p}$, характеризуются функциями плотности распределения $p_i(v_i)$, $i = \overline{1, p}$. Математические модели, в состав которых входят такие параметры, имеют названия вероятностных. В этом случае функции распределения $p_i(v_i)$, $i = \overline{1, p}$ строятся на основании накопленных статистических данных о поведении стохастических параметров v_i ($i = \overline{1, p}$). Трудность применяемой методики связана с необходимостью проведения большого числа экспериментов на объекте во время хода технологического процесса для определения параметров законов распределения стохастических величин.

Другой подход связан с использованием теории нечётких множеств [3] и уходит в сферу субъективной информации. Неопределённые параметры v_i , $i = \overline{1, p}$, характеризуются функциями принадлежности $\mu_i(v_i)$, $i = \overline{1, p}$, которые строятся на основе опросов экспертов. Модели, в которых неопределённые параметры характеризуются функциями принадлежности, получили название нечётких математических моделей. Недостатком этой методики является то, что для надёжного построения функции принадлежности требуется мнение нескольких экспертов. Это не всегда возможно.

На практике чаще всего информация о значении неопределённого параметра v_i задаётся в виде интервального параметра [4] (интервального числа):

$$[v_i] = [\underline{v}_i \leq v_i \leq \overline{v}_i, \underline{v}_i \leq \overline{v}_i] = [\underline{v}_i, \overline{v}_i] \equiv \text{mid}[v_i] \pm \frac{\Delta_i}{2}, \quad i = \overline{1, p},$$

где \underline{v}_i , \overline{v}_i – нижняя и верхняя граница параметра v_i ; $\text{mid}[v_i]$ – середина интервала $[v_i]$ (рис. 2.1):

$$\text{mid}[v_i] = (\underline{v}_i + \overline{v}_i) / 2; \quad (2.1)$$

величина Δ_i – есть интервал, который определяется:

$$\Delta_i = \overline{v}_i - \underline{v}_i. \quad (2.2)$$

Предполагается, что вероятностные или любые другие характеристики, уточняющие расположение точного параметра, внутри или на границе интервала Δ_i отсутствуют. Очевидно, что интервальные числа $[v_i]$ содержат минимальную информацию о неопределённых параметрах, которую проще всего получить. Параметры v_i могут иметь как стохастическую, так и детерминированную природу. Неопределённость параметров, имеющих детерминированную природу, может быть связана с отсутствием знаний об их точных значениях.

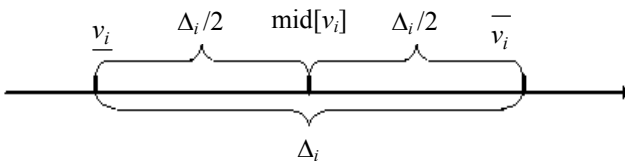


Рис. 2.1. Изображение интервального параметра $[v_i]$ на числовой прямой

Математические модели с такими параметрами получили название интервальных. Определим интервальную математическую модель в виде оператора:

$$[y] = M(u, x, [v]), \quad u \in U, x \in X, y \in Y, v \in V, \quad (2.3)$$

где $[y]$, $[v]$ – интервальные векторы, определяемые как $[y] = ([y_1], [y_2], \dots, [y_i], \dots, [y_m])$, $[v] = ([v_1], [v_2], \dots, [v_i], \dots, [v_p])$; X , U – пространства входных и допустимых управляющих воздействий; Y – пространство выходных величин; V – пространство неопределённых параметров.

Для решения задач проектирования и управления технологическими процессами требуется нахождение вектора выходных параметров $[y]$ интервальной математической модели (2.3).

Решить интервальную математическую модель $[y] = M(u, x, [v])$, это значит для заданного вектора u , x интервального вектора $[v] = ([v_1], \dots, [v_i], \dots, [v_p])$ найти такой вектор $[y] = ([y_1], \dots, [y_j], \dots, [y_m])$, который определяется вектором нижних и верхних границ

$$\underline{y} = (\underline{y}_1, \dots, \underline{y}_j, \dots, \underline{y}_m), \quad \overline{y} = (\overline{y}_1, \dots, \overline{y}_j, \dots, \overline{y}_m).$$

Согласно классификации [2], математические модели технологических процессов разделяются на статические и динамические модели, которые в свою очередь классифицируются на модели с сосредоточенными и распределёнными параметрами, т.е. выделяются четыре класса математических моделей. Для каждого класса существует свой алгоритм решения интервальной модели.

Интервальная статическая модель с сосредоточенными параметрами определяется системой уравнений вида

$$\forall v \in [v]: \quad M(y, u, x, v) = 0, \quad (2.4)$$

где y, u, x, v принадлежат евклидовым пространствам.

Вычисление нижних границ $\underline{y}_j (j = \overline{1, m})$ сводится к решению задач оптимизации:

$$\underline{y}_j = \arg \min_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in F}} y_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad \forall v \in [v]: M(y, u, x, v) = 0, \quad (2.5)$$

где F – множество индексов.

Верхние границы \overline{y}_j определяются из решения задач оптимизации:

$$\overline{y}_j = \arg \max_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in F}} y_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad \forall v \in [v]: M(y, u, x, v) = 0. \quad (2.6)$$

Для сокращения числа элементов множества F проводятся дополнительные исследования зависимости $y_j = y_j(v_i)$, $i = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$ определяемой из модели $[y] = M(u, x, [v])$.

На первом этапе устанавливается правило вычисления границ $\underline{y}_j, \overline{y}_j$. Для этого в точках $v_{i(k)}$ находят соответствующие значения $y_{kj}^{(i)}$, ($k = \overline{1, K_i}$) (рис. 2.2, а), т.е. генерируется последовательность

$$\{y_{1j}^{(i)}, y_{2j}^{(i)}, \dots, y_{kj}^{(i)}, \dots, y_{K_i j}^{(i)}\}. \quad (2.7)$$

Множество индексов, при которых последовательность (2.7) является монотонной, обозначим как L_j , ($L_j \in F, j = \overline{1, m}$).

Вводится обозначение \hat{v}_i , ($i \in L_j$), при котором

$$\underline{y}_j^{(i)} = y_j(\hat{v}_i). \quad (2.8)$$

Параметр \hat{v}_i соответствует границе \underline{v}_i , если последовательность (2.7) монотонно возрастающая, и \hat{v}_i соответствует границе \overline{v}_i , если последовательность (2.7) монотонно убывающая. Аналогично обозначение $\hat{\overline{v}}_i$ ($i \in L_j$) определяет верхнюю границу зависимости

$$\overline{y}_j^{(i)} = y_j(\hat{\overline{v}}_i). \quad (2.9)$$

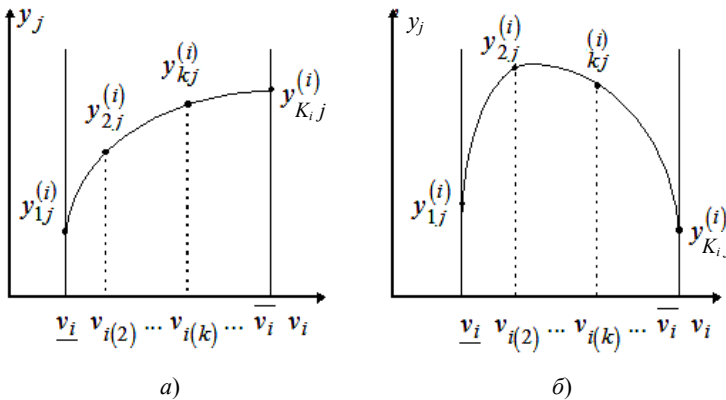


Рис. 2.2. Монотонный (а) и немонотонный (б) характер зависимости $y_j(v_i)$

В общем случае для установления справедливости условия $i \in L_j$ для параметра v_i должны быть сгенерировано множество последовательностей (2.7) при разных случайно выбранных значениях $v_l \in [v_l]$, $(\forall l \in F, l \neq i)$, $u \in U$, $x \in X$. Если все сгенерированные последовательности (2.7) для заданного v_i монотонны, только тогда $i \in L_j$. Как показывают многочисленные исследования, для установления принадлежности i множеству L_j достаточно построения только одной последовательности (2.7), где все остальные неопределённые параметры при расчётах принимают средние значения $\forall l \in F : v_l = \text{mid}[v_l]$, $l \neq i$ составляющие векторов u , x имеют любые фиксированные значения, удовлетворяющие условиям $u \in U$, $x \in X$. Шаг дискретизации Δh_i выбирается априори на основе предварительных расчётов. Если $i \notin L_j$, то последовательность (2.7) носит немонотонный характер (рис. 2.2, б).

Вторым этапом исследования зависимости $y_j^{(i)} = y_j(v_i)$ является определение для выходного параметра y_j значимости интервала Δ_i :

$$\left| \overline{y_j^{(i)}} - \underline{y_j^{(i)}} \right| > \varepsilon_j^i, \quad (2.10)$$

где ε_j^i – допустимая погрешность.

Здесь $\overline{y_j^{(i)}}$, $\underline{y_j^{(i)}}$ определяются из (2.8), (2.9), если $i \in L_j$, в противном случае из решений задач оптимизации

$$\overline{y_j^{(i)}} = \arg \max_{v_i \in [v_i]} y_j, \quad \underline{y_j^{(i)}} = \arg \min_{v_i \in [v_i]} y_j.$$

Если условие (2.10) не выполняется, то интервал Δ_i для y_j считается незначимым, и при определении $\underline{y_j}$, $\overline{y_j}$ задаётся в виде точки со значением $\text{mid}[v_i]$ $i \in N_j$. Множество N_j является множеством индексов i , определяющих параметры $[v_i]$ такие, которые можно задавать в виде числа $\text{mid}[v_i]$ при вычислении $\underline{y_j}$ и $\overline{y_j}$. Таким образом, параметры v_i для $i \in N_j$ исключаются из числа варьируемых пара-

метров при решении задач (2.5), (2.6) для определения нижних и верхних границ $\overline{y_j}$, $\underline{y_j}$.

С учётом изложенного формулировки (2.5), (2.6) представляются в виде

$$[y_j] = \left[\begin{array}{l} \min_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in G_j}} \{y_j | M(y, u, x, v_i, \text{mid}[v_l], \hat{v}_k) = 0\}, \\ \max_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in G_j}} \{y_j | M(y, u, x, v_i, \text{mid}[v_l], \hat{v}_k) = 0\}, \end{array} \right]$$

$$G_j = F \setminus (N_j \cup L_j),$$

$$l \in N_j, \quad k \in L_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.11)$$

К другому классу математических моделей относятся интервальные статические модели с распределёнными параметрами, которые определяются уравнениями вида

$$\forall v \in [v]: M(y'(z), y(z), u, x, v, z) = 0, \quad (2.12)$$

где z – пространственная координата объекта.

На первом этапе исследования зависимости $y_j(z) = y_j(z)(v_i)$, $i = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$, $z \in [0, Z]$ определяется правило вычисления границ $\overline{y_j(z)}$, $\underline{y_j(z)}$. В процессе исследования (рис. 2.3) для каждого $v_{i(k)}$ ($v_{i(k)_i} \in [v_i]$, $k = \overline{1, K_i}$, $v_{i(k+1)} - v_{i(k)} = \Delta h$) строятся зависимости $y_{kj}(z) = y_{kj}(z)(v_{i(k)})$.

Далее по пространственной координате z объекта с шагом Δz определяются точки $z_1, z_2, \dots, z_s, \dots, z_S$. В результате образуются последовательности

$$\left\{ y_{11j}^{(i)}, y_{21j}^{(i)}, \dots, y_{k1j}^{(i)}, \dots, y_{K_i 1j}^{(i)} \right\}, \dots, \left\{ y_{1sj}^{(i)}, y_{2sj}^{(i)}, \dots, y_{ksj}^{(i)}, \dots, y_{K_i sj}^{(i)} \right\}, \dots,$$

$$\left\{ y_{1Sj}^{(i)}, y_{2Sj}^{(i)}, \dots, y_{kSj}^{(i)}, \dots, y_{K_i Sj}^{(i)} \right\}, \quad (2.13)$$

где первый подстрочный индекс означает номер кривой (на рис. 2.3 кривая $y_{kj}(z)$ обозначается как кривая 1, кривая 2, ..., кривая k , ...); второй подстрочный индекс соответствует номеру линии, обозначаемой как сечение s ($s = \overline{1, S}$), на которой лежит точка $y_{ksj}^{(i)}$; третий индекс соответствует номеру выходного параметра y_j .

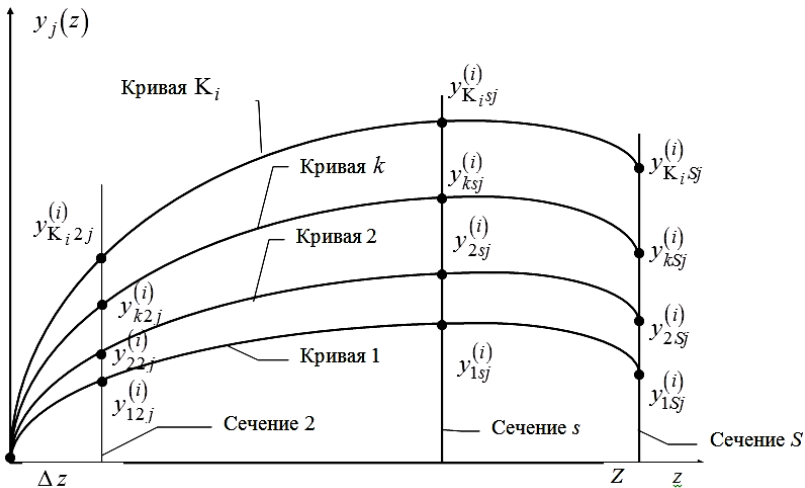


Рис. 2.3. Построение последовательностей $\{y_{1sj}^{(i)}, y_{2sj}^{(i)}, \dots, y_{ksj}^{(i)}, \dots, y_{K_i sj}^{(i)}\}$ при исследовании зависимости $y_j(z)^{(i)}$

Если для заданного i все S последовательностей (2.13) являются монотонными, тогда $i \in L_j$ (рис. 2.4, а). В этом случае нижние и верхние границы определяются соответственно:

$$\underline{y}_j^{(i)}(z) = y_j(z)(\hat{v}_i), \quad (2.14)$$

$$\overline{y}_j^{(i)}(z) = y_j(z)(\hat{v}_i). \quad (2.15)$$

Если хотя бы одна из s ($s = \overline{1, S}$) последовательностей является немонотонной, тогда $i \notin L_j$ (рис. 2.4, б).

На втором этапе определяется значимость интервала Δ_i для выходной переменной $y_j(z)^{(i)}$, согласно неравенству

$$\max_z \left| \overline{y}_j(z)^{(i)} - \underline{y}_j(z)^{(i)} \right| \geq \varepsilon_j^i. \quad (2.16)$$

Здесь $\overline{y}_j(z)^{(i)}$, $\underline{y}_j(z)^{(i)}$ определяются из (2.14), (2.15), если $i \in L_j$.

В противном случае из решений задач оптимизации

$$\overline{y}_j(z)^{(i)} = \arg \max_{v_i \in [v_i]} y_j(z), \quad \underline{y}_j(z)^{(i)} = \arg \min_{v_i \in [v_i]} y_j(z).$$

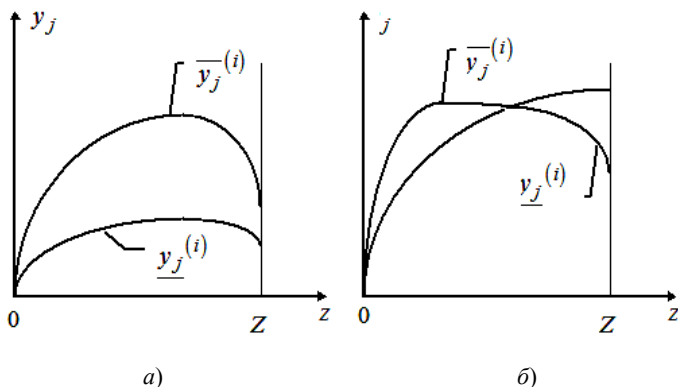


Рис. 2.4. К определению границ интервала $[y_j(z)]$

для зависимости $y_j(z)^{(i)} = y_j(z)(v_i)$, $(v_i \in [v_i])$ при $i \in L_j$ (a); при $i \notin L_j$ (б)

Если условие (2.16) не выполняется, то интервал Δ_i для $y_j(z)$ считается незначимым и при определении $\underline{y}_j(z)$, $\overline{y}_j(z)$ задаётся в виде точки со значением $\text{mid}[v_i]$, $i \in N_j$. Параметры v_i для $i \in N_j$ исключаются из числа варьируемых параметров при решении задач (2.5), (2.6) для определения нижних и верхних границ $\underline{y}_j(z)$, $\overline{y}_j(z)$.

После проведённых исследований интервальный выходной параметр $[y_j(z)]$ определяется по формуле

$$[y_j(z)] = \left[\begin{array}{l} \min_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in G_j}} \left\{ y_j(z) \mid M(y'(z), y(z), u, x, v_i, \text{mid}[v_i], \hat{v}_k, z) = 0 \right\}, \\ \max_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in G_j}} \left\{ y_j(z) \mid M(y'(z), y(z), u, x, v_i, \text{mid}[v_i], \hat{v}_k, z) = 0 \right\} \end{array} \right],$$

$$z \in [0, Z], \quad G_j = F \setminus (N_j \cup L_j),$$

$$l \in N_j, \quad k \in L_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.17)$$

Если в качестве математической модели используется интервальная динамическая модель с сосредоточенными параметрами вида

$$\forall v \in [v]: M(y'(\tau), y(\tau), u, x, v, \tau) = 0, \quad (2.18)$$

то методика исследования модели (2.18) аналогична методике, применяемой для модели (2.12). В этом случае координата z заменяется на временной параметр τ . Исследование для интервальной динамической модели с распределёнными параметрами

$$\forall v \in [v]: M(y'_\tau(\tau, z)y'_z(\tau, z), u, x, v, \tau, z) = 0, \quad (2.19)$$

где $y'_\tau(\tau, z)y'_z(\tau, z)$ – частные производные соответственно по времени и координате, основывается на методике, применённой к модели (2.12).

На первом этапе по методике, как для модели (2.12), проводится исследование зависимости $y_j(\tau, z)(v_i)$ на принадлежность i к множеству L_j . Сначала для фиксированного момента времени $\tau = \tau_c$ при $z \in [0, Z]$ проводится анализ интервального параметра $[v_i]$ на принадлежность i к множеству L_j , далее в точке $z = z_c$ при $\tau \in [0, T]$ проводится аналогичное исследование. Если в обоих случаях справедливо отношение $i \in L_j$, тогда можно при вычислении $[y_j]$ принимать во внимание для параметра $[v_i]$ только верхние \overline{v}_i и нижние \underline{v}_i его границы, т.е. параметр $[v_i]$ соответствует множеству L_j .

На втором этапе проводится анализ на значимость интервала Δ_i . Если одновременно интервал Δ_i незначим для зависимостей $y_j(\tau_c, z)$ при $\tau \in [0, T]$ и $y_j(\tau, z_c)$ при $z \in [0, Z]$, тогда параметр $[v_i]$ можно заменить точкой $\text{mid}[v_i]$ и принять $i \in N_j$.

После проведённых исследований интервальный выходной параметр модели (2.19) определяется:

$$[y_j(\tau, z)] = \left[\begin{array}{l} \min_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in G_j}} \left\{ y_j(\tau, z) \middle| M(y'_\tau(\tau, z)y'_z(\tau, z), u, x, v_i, \text{mid}[v_i], \hat{v}_k, \tau, z) = 0 \right\}, \\ \max_{\substack{v_i \in [v_i] \\ \forall i \in G_j}} \left\{ y_j(\tau, z) \middle| M(y'_\tau(\tau, z)y'_z(\tau, z), u, x, v_i, \text{mid}[v_i], \hat{v}_k, \tau, z) = 0 \right\}, \end{array} \right]$$

$$z \in [0, Z], \tau \in [0, T],$$

$$G_j = F \setminus (N_j \cup L_j), \quad l \in N_j, \quad k \in L_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.20)$$

Таким образом, представленная методика позволяет найти выходные параметры интервальной модели, которые определяются верхней и нижней границей выходного параметра.

Данная методика реализована на примере процесса обжига во вращающейся печи. Вращающаяся печь – это промышленная печь цилиндрической формы с вращательным движением вокруг продольной оси, предназначенная для нагрева или обжига материалов с целью их физико-химической обработки [5]. Для поддержания температурного режима применяется факельное сжигание природного газа или мазута. Материал в печи движется противотоком продуктам сгорания.

Нами разработана математическая модель процесса обжига во вращающейся печи [6]:

$$\frac{dT_M}{dl} = \frac{\varepsilon_M \sigma_0 (T_G^4 - T_M^4) \pi d \Delta l - \frac{2\pi(T_M - T_{ст})\Delta l}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{D}{d}}}{\theta_M G_M}, \quad (2.21)$$

$$\frac{dT_G}{dl} = \frac{\varepsilon_M \sigma_0 (T_G^4 - T_M^4) \pi d \Delta l - 2m G_T \Omega e^{-m(L-l)^2} (L-l)}{\theta_G G_G}, \quad (2.22)$$

$$\frac{2\pi(T_M - T_{ст})\Delta l}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{D}{d}} = \varepsilon_{ст} \sigma_0 (T_{ст}^4 - T_{ср}^4) \pi D \Delta l, \quad (2.23)$$

$$T_M |_{l=0} = T_M^{BX}, \quad (2.24)$$

$$T_G |_{l=L} = T_G^{BXX}, \quad (2.25)$$

где T_M – температура материала, К; T_G – температура газа, К; $T_{ст}$ – температура стенки, К; $T_{ср}$ – температура среды, К; l – текущая длина печи, м; $\varepsilon_{ст}$ – степень черноты футеровки; ε_M – степень черноты материала; d – внутренний диаметр печи, м; D – внешний диаметр печи, м; L – общая длина печи, м; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, Вт/м²К⁴; λ – коэффициент теплопроводности материала футеровки, Вт/мК; Ω – тепло, выделяющееся от сгорания 1 кг топлива (удельная теплота сгорания), Дж/кг; θ_M – теплоёмкость материала, Дж/кг°С; θ_G – теплоёмкость газа, Дж/кг°С; G_M – расход материала, кг/с; G_G – расход газа, м³/с; G_T – расход топлива, м³/с; m – эмпирический коэффициент.

В данной математической модели есть неопределённые параметры, численные значения которых изначально неизвестны. Это степень черноты материала ε_m , теплоёмкость материала θ_m и длина факела l_ϕ . Эмпирический коэффициент m зависит от длины факела, следовательно, изменение длины факела влечёт за собой изменение данного эмпирического коэффициента.

Математическая модель процесса обжига во вращающейся печи относится к классу статических моделей с распределёнными параметрами.

Для успешного ведения технологического процесса необходимо обеспечить заданную температуру материала в определённых точках в каждой печи. В условиях неопределённости параметров математической модели постановка задачи обеспечения заданного технологического режима формулируется следующим образом: для заданных условий окружающей среды T_{cp} , производительности установки G_M необходимо найти расход топлива G_T , при которых достигается выполнение технологических условий производства, т.е. интервал значения температуры на заданной длине печи должен быть подмножеством интервала температуры заданного технологом:

$$\left[\underline{T_{m1}^*}, \overline{T_{m1}^*} \right] \subset \left[\underline{T_{m1}^3}, \overline{T_{m1}^3} \right], \left[\underline{T_{m2}^*}, \overline{T_{m2}^*} \right] \subset \left[\underline{T_{m2}^3}, \overline{T_{m2}^3} \right].$$

На первом этапе необходимо задать границы интервалов для неопределённых параметров: $[\varepsilon_m] = [0,3, 0,7]$; $[\theta_m] = [1000, 1200]$; $[l_\phi] = [7, 15]$. В данных математических моделях выходными параметрами являются распределение температур газа, материала и стенки по длине печи, но наиболее важный параметр для процесса обжига это температура материала, следовательно, все расчёты проведём только для температуры материала.

Далее необходимо построить последовательности (2.13). Строится график зависимости степени черноты материала равной 0,3 от всех остальных интервальных величин, и из них находим верхнюю и нижнюю границу (рис. 2.5).

Аналогично строим зависимости для $[\varepsilon_m] = 0,4$; $[\varepsilon_m] = 0,5$; $[\varepsilon_m] = 0,6$; $[\varepsilon_m] = 0,7$.

После проведённых исследований находим верхнюю и нижнюю границу для всего интервала $[y_j(z)]$ (рис. 2.6).

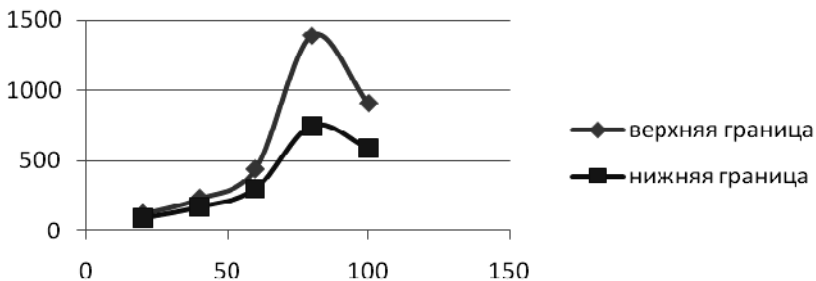


Рис. 2.5. Границы интервала $\underline{y_j(z)}, \overline{y_j(z)}$ для $[\epsilon_m] = 0,3$

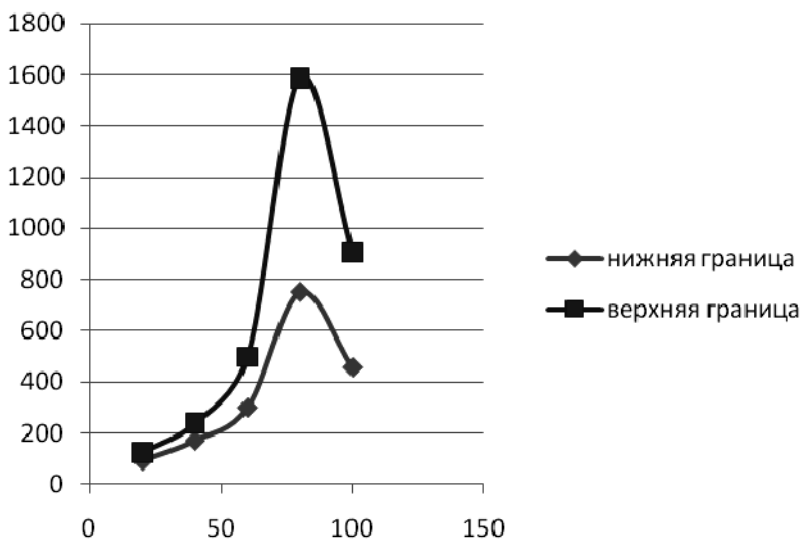


Рис. 2.6. Границы интервала $[y_j(z)]$ для противотока

Как видно из рисунка 2.6, распределение температуры материала находится в области между верхней и нижней границами.

Далее определяется значимость интервала Δ_i для выходной переменной, согласно неравенству (2.16). Параметр ϵ_j^i это допустимая погрешность, значение которой задаётся технологом. В данном случае погрешность составляет 3 °С. Как видно из рисунка 2.5 интервал Δ_i является значимым.

Следовательно, данная методика позволяет гарантированно вычислять интервал выходных значений математических моделей, что даёт преимущества перед другими способами раскрытия неопределённостей в математических моделях.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите преимущества и недостатки аналитических математических моделей.
2. Охарактеризуйте существующие подходы к раскрытию неопределённостей.
3. Раскройте понятие интервальной математической модели.
4. Приведите классификацию математических моделей технологических процессов.
5. Назовите неопределённые параметры математической модели процесса обжига во вращающейся печи.
6. Сформулируйте постановку задачи обеспечения заданного технологического режима в условиях неопределённости параметров математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

1. *Кафаров, В. В.* Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М. : Высшая школа, 1991. – 400 с.
2. *Алон, Н.* Вероятностный метод / Н. Алон, Дж. Спенсер. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 320 с.
3. *Новак, В.* Математические принципы нечёткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкрож. – М. : Физматлит, 2006. – 352 с.
4. *Добронец, Б. С.* Интервальная математика / Б. С. Добронец. – Красноярск : Краснояр. гос. ун-т, 2004. – 219 с.
5. *Лисиенко, В. Г.* Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология : Справочное издание в 2-х кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2004. – Кн. 2 – 592 с.
6. *Фролова, Т. А.* Математическое моделирование процесса обжига во вращающихся печах / Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Информатика: проблемы, методология, технология : материалы XII Междунар. науч.-метод. конф. – Воронеж : ИПЦ Воронеж. гос. ун-та, 2012. – С. 424.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТИПА "ТРУБА-В-ТРУБЕ" НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПРИВЕДЁННЫХ ЗАТРАТ

3.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТИПА "ТРУБА-В-ТРУБЕ"

Процессы теплообмена находят широкое применение в химической, нефтеперерабатывающей, энергетической, металлургической и пищевой промышленности. Теплообменники различных типов используются в промышленности для нагревания холодных и охлаждения нагретых сред, для проведения процессов испарения, конденсации, выпаривания, плавления, кристаллизации [1, 2].

Одна из простейших конструкций теплообменника – "труба-в-трубе" – представляет собой две коаксиально расположенные трубы с рабочими каналами по межтрубному (кольцевому) и трубному пространствам [3]. Как правило, их используют для охлаждения или нагревания в системе жидкость-жидкость, когда расходы теплоносителей невелики, и они не меняют своего агрегатного состояния. Несмотря на то, что при равных теплообменных характеристиках они менее компактны и более металлоёмки, чем, например, кожухотрубчатые теплообменники, они имеют меньшее гидравлическое сопротивление. При этом высокие скорости и турбулентность потоков теплоносителей уменьшают возможность образования отложений на стенках труб.

Теплообменники "труба-в-трубе" используются вместо кожухотрубчатых теплообменников при выполнении хотя бы одного из следующих условий: низкий коэффициент теплоотдачи со стороны кожуха. Если отношение коэффициентов теплоотдачи внутри труб к коэффициентам в межтрубном пространстве больше 2:1, то следует использовать развитые поверхности. Типичным примером могут служить теплообменники с газом или вязкими жидкостями в межтрубном пространстве и водой, паром или жидкостью с низкой вязкостью в трубах. Чем больше это отношение, тем более эффективным будет применение развитых поверхностей, поскольку при этом могут быть увеличены число и размер рёбер "пересечение" или близкие значения температур по горячей и холодной стороне. Конструкция теплообменников "труба-в-трубе" позволяет в точности воспроизвести режим противотока, и ситуация, при которой возникает "пересечение" температур, легко устранима. Поскольку теплообменники типа "труба-в-трубе"

имеют модульную структуру, они могут быть смонтированы последовательно и параллельно с минимумом коммуникационных трубопроводов и на общем фундаменте; высокие давления. Для выбранной мощности теплообменники "труба-в-трубе" имеют меньший диаметр наружной трубы, чем диаметр кожуха в кожухотрубчатых теплообменниках. Наружные трубы обычно не имеют сварных швов, и их диаметр варьирует от 50 до 200 мм, хотя в особых случаях возможны и большие диаметры. Следовательно, при высоком давлении в наружной трубе требуется меньшая толщина стенок из-за малого диаметра; малые мощности. Теплообменники "труба-в-трубе" часто используются для небольших мощностей, при которых нет необходимости применять оребренные трубы (например, при использовании в качестве теплоносителя воды).

В этом случае применяются гладкие трубы или пучки гладких труб. Вследствие большого разнообразия комбинаций коэффициентов теплоотдачи, конструкционных материалов, давлений и так далее трудно определить максимальную мощность или тепловую нагрузку, которая может быть рекомендована для теплообменников "труба-в-трубе". Но мощность, примерно 1000 кВт, можно считать экономической обоснованной.

Неразборные однопоточные теплообменники "труба-в-трубе" ТТОН предназначены для таких условий эксплуатации, когда среда, проходящая в кольцевом пространстве, не даёт отложений, вызывающих необходимость механической очистки наружной поверхности теплообменных труб.

Аппараты с приварными двойниками (1 исполнение) предназначены для условий, когда среда трубного пространства также не требует механической очистки внутренней поверхности теплообменных труб. Аппараты со съёмными двойниками (2 исполнение) наиболее пригодны для эксплуатации, вызывающих необходимость регулярной механической очистки внутренней поверхности теплообменных труб от загрязнения.

3.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТИПА "ТРУБА-В-ТРУБЕ"

Основным видом технологического расчёта теплообменных устройств является тепловой расчёт, позволяющий определить требуемую поверхность теплообмена. Как правило, в качестве критерия оптимизации конструкции теплообменника используются капитальные затраты, которые напрямую зависят от площади его рабочей поверхности: чем меньше поверхность, тем меньше стоимость. Капитальные затраты

на теплообменник типа "труба-в-трубе" можно оценить как произведение объёма стенок внутренней (теплообменной) и внешней (кожуховой) труб на плотность и цену материала, из которого они изготовлены. Если допустить, что обе трубы изготовлены из одного и того же материала, то

$$S_{\text{кап}} = C_{\text{кг}} V_{\text{тр}} \rho_{\text{мат}}$$

где $C_{\text{кг}}$ – цена одного килограмма материала труб, р./кг; $\rho_{\text{мат}}$ – плотность материала труб, кг/м³; $V_{\text{тр}} = L(S_{\text{T}} + S_{\text{K}})$ – общий объём материала труб, м³; $S_{\text{T}} = 0,25\pi[(d_{\text{T}} + 2\delta_{\text{T}})^2 - d_{\text{T}}^2]$, $S_{\text{K}} = 0,25\pi[(d_{\text{K}} + 2\delta_{\text{K}})^2 - d_{\text{K}}^2]$ – площади поперечного сечения теплообменной и кожуховой трубы, м²; d_{T} , δ_{T} – внутренний диаметр и толщина стенки теплообменной трубы, м; d_{K} , δ_{K} – внутренний диаметр и толщина стенки кожуховой трубы, м; $L = F/[\pi(d_{\text{T}} + \delta_{\text{T}})]$ – необходимая длина труб теплообменника, м; F – рабочая поверхность теплообменника, м².

Величина рабочей поверхности теплообменника определяется значениями коэффициентов теплоотдачи от теплоносителей, которые зависят от скорости их движения: чем выше скорость, тем выше значения коэффициента теплоотдачи [1, 2, 7]. Однако при увеличении скоростей увеличиваются и потери давления, вызванные трением потоков теплоносителей о стенки труб. Согласно [2, 4, 6], потери давления в теплообменной трубе можно определить следующим образом:

$$\Delta P_{\text{T}} = \zeta_{\text{T}} \frac{L}{d_{\text{T}}} \frac{\rho_{\text{T}} u_{\text{T}}^2}{2},$$

$$\text{где } \zeta_{\text{T}} = \begin{cases} 0,316/\text{Re}_{\text{T}}^{0,25}, & \text{Re}_{\text{T}} > 10000 \\ 1 + e^{1-\text{Re}_{\text{T}}/2300} \left(\frac{202,53}{\text{Re}_{\text{T}}^{0,75}} - 1 \right), & 2300 \leq \text{Re}_{\text{T}} \leq 10000 \\ 64/\text{Re}_{\text{T}}, & \text{Re}_{\text{T}} < 2300 \end{cases} \quad \text{– коэффициент}$$

трения в теплообменной трубе; $\text{Re}_{\text{T}} = \frac{u_{\text{T}} d_{\text{T}} \rho_{\text{T}}}{\mu_{\text{T}}}$ – критерий Рейнольдса

для потока в теплообменной трубе; ρ_{T} , μ_{T} – плотность (кг/м³) и динамическая вязкость (Па·с) потока в теплообменной трубе при средней

температуре теплоносителя; $u_{\text{T}} = \frac{G_{\text{T}}}{\rho_{\text{T}}(0,25\pi d_{\text{T}}^2)}$ – скорость потока в теплообменной трубе, м/с; G_{T} – массовый расход потока в теплообменной трубе, кг/с.

Потери давления в кожуховой трубе:

$$\Delta P_k = \zeta_k \frac{L}{d_{кэ}} \frac{\rho_k u_k^2}{2},$$

$$\text{где } \zeta_k = \begin{cases} 0,316 / \text{Re}_k^{0,25}, & \text{Re}_k > 10000 \\ 1 + e^{1 - \text{Re}_k / 2300} \left(\frac{303,8}{\text{Re}_k^{0,75}} - 1 \right), & 2300 \leq \text{Re}_k \leq 10000 \\ 96 / \text{Re}_k, & \text{Re}_k < 2300 \end{cases} \quad \text{-- коэффициент}$$

трения в кольцевом канале кожуховой трубы; $d_{кэ} = \frac{d_k^2 - (d_T + 2\delta_T)^2}{d_k + d_T + 2\delta_T}$ –

эквивалентный диаметр кольцевого канала кожуховой трубы, м;

$\text{Re}_k = \frac{u_k d_{кэ} \rho_k}{\mu_k}$ – критерий Рейнольдса для потока в кожуховой трубе;

ρ_k, μ_k – плотность (кг/м³) и динамическая вязкость (Па·с) потока в ко-

жуховой трубе при средней температуре; $u_k = \frac{G_k}{\rho_k (0,25\pi d_{кэ}^2)}$ – скорость

потока в кожуховой трубе, м/с; G_k – массовый расход потока в кожуховой трубе, кг/с.

Затраты на эксплуатацию теплообменника типа "труба-в-трубе" связаны, главным образом, с обеспечением требуемых расходов теплоносителей по трубам, поэтому годовые эксплуатационные затраты на теплообменник можно оценить как произведение суммарной мощности, необходимой для преодоления потерь давления теплоносителей в теплообменной и кожуховой трубе, на стоимость электроэнергии и на время эксплуатации теплообменника в течение года:

$$S_{\text{эсп}} = N_{\text{пр}} C_э \tau_э,$$

где $N_{\text{пр}} = \left(G_T \frac{\Delta P_T}{\rho_T} + G_k \frac{\Delta P_k}{\rho_k} \right) \cdot 10^{-3}$ – суммарная мощность, необхо-

димая для прокачки теплоносителей в теплообменной и кожуховой трубе, кВт; $C_э$ – стоимость электроэнергии, р./кВт·ч; $\tau_э$ – время эксплуатации в течение года, ч/год.

Уменьшение рабочей поверхности теплообменника с целью снижения капитальных затрат может потребовать, при прочих равных условиях, увеличения скорости движения теплоносителей, и, как следствие, – увеличения эксплуатационных расходов. Таким образом, при

решении задачи оптимального проектирования теплообменника должен быть достигнут компромисс между снижением капитальных и увеличением эксплуатационных расходов, поэтому в качестве критерия оптимальности конструкции теплообменника предлагается использовать приведённые затраты:

$$S_{\text{прив}} = S_{\text{кап}}/T_{\text{но}} + S_{\text{экср}},$$

где $T_{\text{но}} = 6$ – нормативный срок окупаемости капитальных затрат на оборудование, год.

Таким образом, если предположить, что движение теплоносителей по обеим трубам теплообменника "труба-в-трубе" не сопровождается фазовыми переходами, что обе трубы теплообменника изготовлены из одного и того же материала и что теплофизические свойства теплоносителей в обеих трубах постоянны и равны их значениям при средних температурах, то задачу оптимального проектирования теплообменника можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такие оптимальные диаметры теплообменной (внутренней) трубы $d_{\text{т}}^*$ и кожуховой (внешней) трубы $d_{\text{к}}^*$, длину труб L^* , при которых приведённые затраты на аппарат достигнут минимума, т.е.

$$S_{\text{прив}}(d_{\text{т}}, d_{\text{к}}, L) = S_{\text{кап}}(d_{\text{т}}, d_{\text{к}}, L)/T_{\text{но}} + S_{\text{экср}}(d_{\text{т}}, d_{\text{к}}, L) \Rightarrow \min_{d_{\text{т}}, d_{\text{к}}, L}$$

- при условиях

$$d_{\text{т}} \in D_{\text{т}}, \quad d_{\text{к}} \in D_{\text{к}},$$

$$L \geq \frac{Q}{K\Delta t_{\text{ср}}\pi(d_{\text{т}} + \delta_{\text{т}})}.$$

где $D_{\text{т}}$ – множество доступных диаметров теплообменных труб; $D_{\text{к}}$ – множество доступных диаметров кожуховых труб; Q – тепловая нагрузка теплообменника, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\Delta t_{\text{ср}}$ – среднелогарифмическая разность температур между теплоносителями в теплообменной и кожуховой трубами, К.

Методика определения значений $S_{\text{кап}}$ и $S_{\text{экср}}$ приведена выше, значения Q , $\Delta t_{\text{ср}}$ и K определяются согласно [1 – 3, 7], толщины стенок труб ($\delta_{\text{т}}$ и $\delta_{\text{к}}$) однозначно определяются выбором значений $d_{\text{т}}$ и $d_{\text{к}}$. В качестве исходных данных указывается материал труб и задаются теплофизические свойства теплоносителей. Для теплоносителя в одной из труб задаются массовый расход, начальная и конечная температура; для теплоносителя в другой трубе задаются либо начальная и конечная температура, либо начальная температура и массовый расход.

3.3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ РАСЧЁТОВ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТИПА "ТРУБА-В-ТРУБЕ"

Вычислительные эксперименты по решению поставленной задачи проводились с помощью разработанной системы Annular Tube Design, предназначенной для автоматизированных расчётов теплообменников типа "труба-в-трубе" (рис. 3.1). Система включает программные модули, разработанные в среде Microsoft Visual C#.

В состав системы входит справочник теплофизических свойств веществ, содержащий зависимости характеристик нескольких десятков рабочих сред и теплоносителей от температуры. Значения характеристик веществ представлены в реляционной базе данных с использованием парадигмы "объект–свойство–значение" [5].

При выборе вещества из базы данных все его теплофизические свойства задаются автоматически (если они известны). Также допускается ввод их значений пользователем системы. Кроме того, система содержит каталог диаметров и толщин стенок стандартных кожуховых и теплообменных труб, используемых в промышленности. Расчёт требуемой поверхности теплообмена состоит из нескольких этапов [2, 3, 7].

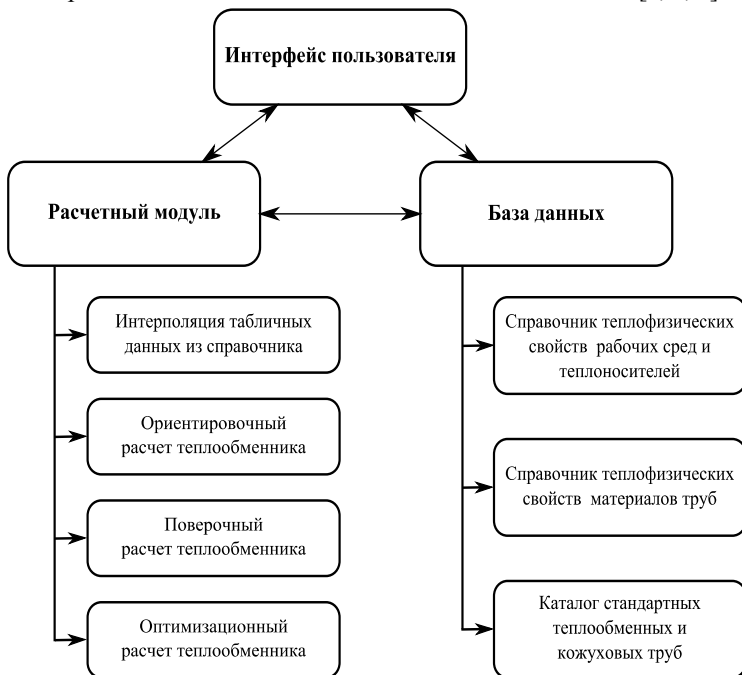


Рис. 3.1. Структура системы расчёта теплообменников "труба-в-трубе" Annular Tube Design

1. Определение тепловой нагрузки аппарата, среднелогарифмического температурного напора и средних температур теплоносителей.
2. Определение из уравнения теплового баланса расхода теплоносителя, для которого заданы начальная и конечная температуры, либо конечной температуры, если задан расход и начальная температура.
3. Если выбран ориентировочный расчёт, то по рекомендуемым [1, 2, 7] значениям коэффициента теплопередачи определяется ориентировочная поверхность теплообмена и длина теплообменника.
4. Если выбран поверочный расчёт, то вычисляются значения площадей проходных сечений трубного и межтрубного пространства, определяются режимы движения теплоносителей и производится выбор критериальных уравнений для определения коэффициентов теплоотдачи от теплоносителей.
5. Определение коэффициентов теплоотдачи и температур стенок со стороны теплоносителей путём решения системы уравнений баланса тепловых потоков.
6. Пересчёт коэффициента теплопередачи с учётом найденных коэффициентов теплоотдачи и термических сопротивлений слоёв загрязнений стенок со стороны продукта и теплоносителя.
7. Определение расчётной поверхности теплообмена по основному уравнению теплопередачи, расчёт длины и окончательный выбор теплообменника.

3.4. ПРИМЕРЫ РАСЧЁТОВ

Пример работы системы представлен на рис. 3.2. Решение оптимизационной задачи вследствие её небольшой размерности осуществляется методом полного перебора сочетаний доступных диаметров кожуховых и теплообменных труб. Всего в каталоге стандартных труб содержится информация о 14 диаметрах кожуховых ($|D_k| = 14$) и 21 диаметре теплообменных труб ($|D_t| = 21$). Таким образом, максимальное число возможных вариантов сочетаний диаметров равно $|D_k| \cdot |D_t| = 14 \cdot 21 = 294$. Продолжительность перебора не превышает десяти секунд.

В качестве тестового примера использовался расчёт реального теплообменника типа "труба-в-трубе", проектируемого для ОАО "Пигмент", г. Тамбов.

Аппарат предназначен для охлаждения ацетона холодильным раствором CaCl_2 (25%). Во внутреннюю трубу теплообменника подаётся ацетон (продукт) с массовым расходом 7797 кг/ч, начальной температурой 40 °С и конечной температурой 20 °С. Материал теплообменника – сталь 20, цена 43 р./кг (2011 г.). Цена электроэнергии принималась равной 2 р./(кВт·ч). Результаты расчётов представлены в табл. 3.1.

Оптимизация теплообменника "труба в трубе" 1.0.0.0 - [Теплообменник: Труба в трубе - X:\sv2005\project\AnnularTube\samples\Труба в трубе.xls]

Файл Расчет Сервис Довод

1. Параметры расчета
 Тип расчета: **Полноразмерный**

2. Внутренняя труба
 Назначение вещества/га: **Продукт**
 Агрегатное состояние: **Жидкое**
 Вещество/смесь: **Ацетон (100)**
 Начальная температура, t: **40**
 Конечная температура, t: **20**
 Массовый расход, kg/s: **7797**

3. Внешняя труба
 Назначение вещества/га: **Теплоноситель/Амортизатор**
 Агрегатное состояние: **Жидкое**
 Вещество/смесь: **Раствор CaCl2 (100)**
 Начальная температура: **-12**
 Конечная температура, t: **9**
 Массовый расход, kg/s: **NaN**

4. Теплообменник
 Схема теплообмена: **Полнообъемный**
 Материал внутренней тр: **Углеродистая сталь 20**
 Вн. диаметр теплообмен: **100**
 Толщина стенки теплооб: **5**
 Внутр. диаметр кожуха: **300**
 Толщина стенки кожуха: **8**

Тип расчета
 Тип расчета теплообменного устройства (прямоточный, противоточный или по заданному коэф.)

Формулы для расчета коэффициентов теплоотдачи
 Коэффициент теплоотдачи для пространства внутренней трубы рассчитывается по формуле для случая вынужденного движения жидкости или газа по трубам и каналам
 Источник: Методы расчетов процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). Учеб. пособие для вузов/ П.Г. Романков и др. - СПб: Химия, 1993. с. 128, 129
 Критерий Рейнольдса для внутренней трубы: 88416,280
 Турбулентный режим (Re>10000)

$$\alpha := \frac{\lambda}{d} \cdot 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

Коэффициент теплоотдачи для пространства внешней трубы рассчитывается по формуле для случая вынужденного движения жидкости или газа по трубам и каналам
 Источник: Методы расчетов процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). Учеб. пособие для вузов/ П.Г. Романков и др. - СПб: Химия, 1993. с. 128, 129
 Критерий Рейнольдса для внешней трубы: 8582,796
 Переходный режим (2300<Re<10000)

$$\alpha := \frac{\lambda}{d} \cdot 0,0015 \cdot Re^{1,09} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

Найденные температуры стенок
 Температура стенки во внутренней трубе, гр.С: 16,981
 Температура стенки во внешней трубе, гр.С: 16,260
 Первое уравнение системы: -1,854e-07
 Второе уравнение системы: 1,32e-07

Результат расчета
 Коэффициент теплопр-ти материала трубы, Вт/(м*К): 52
 Коэфф-т теплоотдачи во внутр. трубе, Вт/(м.кв.*К): 576,053
 Коэфф-т теплоотдачи во внешн. трубе, Вт/(м.кв.*К): 280,255
 Сопр-е загрязнений во внутренней трубе, м.кв.*К/Вт: 0,00010
 Сопр-е загрязнений во внешней трубе, м.кв.*К/Вт: 0,00020
 Коэффициент теплопередачи, Вт/(м.кв.*К): 175,430
 Тепловой поток по продукту, Вт: 97089,708
 Требуемая поверхность теплообмена, м.кв.: 13,871
 Требуемая длина теплообменника, м: 42,051

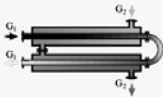


Рис. 3.2. Пример работы системы Annular Tube Design

По представленным результатам хорошо видно, как соотносятся капитальные и эксплуатационные затраты на теплообменники типа "труба-в-трубе": эксплуатационные затраты могут превышать капитальные в десятки раз. Без учёта эксплуатационных затрат выгоднее приобрести теплообменник площадью 1,39 м² за 5917 р., вместо теплообменника площадью 2,8 м² за 14 872 р. (разница в цене ~2,5 раза).

3.1. Результаты оптимизационного расчёта теплообменника

Характеристика	Значения			
	49	68	79	98
Внутренний диаметр кожуховой трубы, мм	49	68	79	98
Внутренний диаметр теплообменной трубы, мм	19	19	40	40
Требуемая поверхность теплообмена, м ²	1,39	1,68	2,38	2,80
Длина теплообменника, м	20,05	24,31	17,18	20,27
Капитальные затраты S _{кап} , р.	5917	9133	10 872	14 872
S _{кап} /T _{но} , р./год	986	1522	1812	2479
Годовые эксплуатационные затраты S _{экс} , р./год	52 381	35 844	6780	4145
Приведённые затраты S _{прив} , р./год	53 367	37 366	8592	6624

Однако, эксплуатационные затраты на первый теплообменник составят 52 381 р./год, а на второй – 4145 р./год (разница в эксплуатационных затратах ~12,6 раза в пользу второго теплообменника). Приведённые затраты, учитывающие как капитальную, так и эксплуатационную составляющую, отличаются почти в 8 раз также в пользу второго теплообменника.

В дальнейшем предполагается использовать предложенную методику для оптимизационных расчётов других типов теплообменного оборудования, например кожухотрубчатых теплообменников.

3.5. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА И ВЫБОРА ТЕПЛООБМЕННИКА

С помощью информационной системы Annular Tube Design осуществить оптимальный тепловой расчёт теплообменника типа "труба-в-трубе", подходящий для реализации указанного процесса в заданных условиях, представленных в табл. 3.2.

3.2. Исходные данные для расчёта и выбора теплообменника

Процесс		Продукт				Тепло-хладагент			
		V_{1s} , м ³ /ч	t_{1in} , °C	t_{1ex} , °C	$P_{1абс}$, МПа	V_{2s} , м ³ /ч	t_{2in} , °C	t_{2ex} , °C	$P_{2абс}$, МПа
1	Охлаждение	Этилацетат				Баражная вода			
		30	77	30	0,1	40	10	–	0,1
2	Нагревание	Хлорбензол				Масло АМТ–300			
		20	30	20	30	20	30	20	30
3	Нагревание	Вода				Воздух			
		2,2	10	80	0,1	12000	150	–	0,1
4	Охлаждение	Метилловый спирт				Воздух			
		21,3	100	35	0,3	23500	20	–	0,1
5	Охлаждение	Воздух				Баражная вода			
		17500	30	–5	0,1	35	10	–	0,1
6	Охлаждение	Бензол				Рассол (25% раствор CaCl ₂)			
		35	100	30	0,2	–	–12	–4	0,1
7	Охлаждение	Толуол				Рассол (25% раствор CaCl ₂)			
		38,5	110	25	0,13	15	–15	–	0,1
8	Нагревание	Воздух				Вода			
		14000	20	200	0,1	30	90	–	0,1
9	Охлаждение	Уксусная кислота				Вода			
		10,6	110	20	0,15	20	15	–	0,1
10	Нагревание	Этилацетат				Вода			
		30,5	20	80	0,35	25	90	–	0,1
11	Нагревание	Четырёххлористый углерод				Масло АМТ–300			
		52,7	25	95	0,35	75	300	–	0,1
12	Нагревание	Этиловый спирт				Масло АМТ–300			
		2,7	5	65	0,1	15	300	–	0,1

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите назначение и область применения теплообменников типа "труба-в-трубе".
2. При каких условиях требуется развитая поверхность теплообмена?
3. Перечислите основные виды расчётов теплообменников.
4. Какие теплофизические характеристики рабочих сред и теплоносителей требуются при проведении тепловых расчётов теплообменников?
5. С чем связаны основные затраты на эксплуатацию теплообменника типа "труба-в-трубе"?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

1. *Романков, П. Г.* Теплообменные процессы химической технологии / П. Г. Романков. – Л. : Химия, 1982. – 288 с.
2. *Методы* расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): учебное пособие для вузов / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк, М. И. Курочкина. – СПб. : Химия, 1993. – 496 с.
3. *Ишмурзин, А. А.* Процессы и оборудование системы сбора и подготовки нефти, газа и воды : учебное пособие / А. А. Ишмурзин, Р. А. Храмов. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2003. – 145 с.
4. *Андрижиевский, А. А.* Оптимизация расчёта теплообменника "труба в трубе" / А. А. Андрижиевский, О. Н. Веремеева, А. Г. Трифонов // *Exponenta Pro. Математика в приложениях.* – 2004. – № 1(5). – С. 28 – 33.
5. *Мокрозуб, В. Г.* Представление структуры изделий в реляционной базе данных / В. Г. Мокрозуб // *Информационные технологии.* – 2008. – № 11. – С. 11 – 13.
6. *Гидравлика, гидромашин и гидроприводы*: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.
7. *Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию* / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др. ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М. : Химия, 1991. – 496 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЛИТ ВУЛКАНИЗАЦИОННЫХ ПРЕССОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ

Традиционно отечественные производители вулканизационных прессов [1, 2] уделяют внимание равномерности температурного поля на рабочей поверхности нагревательных плит. Например, согласно паспортным данным, плиты пресса 250-600 4Э при средней температуре 170 °С имеют перепад температуры в различных точках рабочей зоны ± 3 °С, а при средней температуре 200 °С – ± 5 °С [3].

Заметим, что зарубежные производители вулканизационных прессов, например, Beier Industry Co., Ltd. (Китай) [4], Jing Day Machinery Industrial Co., Ltd. (Тайвань) [5], Yatong rubber machine Co., Ltd. (Корея) [6] в технических характеристиках оборудования не приводят данные о параметрах температурного поля на рабочей поверхности нагревательных плит. Можно предположить, что этими фирмами задача получения только равномерных температурных полей нагревательных плит не ставится.

Практика показывает, что формирование заданного распределения температур на поверхности плиты не всегда является возможным из-за внешнего теплообмена [7 – 9]. Кроме того, плита пресса представляет собой сложную систему обогрева пресс-форм резинотехнических изделий (РТИ), основная функция которой – создание требуемого температурного поля в объёме прессуемого изделия. Для решения этой проблемы необходимо рассчитывать процессы распространения тепла в системе "плита – пресс-форма – изделие". Важно отметить, что данную задачу следует рассматривать как трёхмерную нестационарную и учитывать нелинейные зависимости теплофизических свойств материалов от температуры нагрева.

Таким образом, качество продукции определяется степенью соответствия температурного поля в объёме изделия требованиям технологического регламента, прежде всего, степенью неравномерности. В общем случае, помимо системы обогрева, на температурное поле изделия влияют параметры пресс-формы (геометрия, теплофизические свойства материала) и её расположение на поверхности плиты.

С учётом вышесказанного можно предложить три общих подхода к проектированию нагревательных плит:

- 1) *интегральный*, позволяющий получить температурное поле заданного профиля на рабочей поверхности плиты;

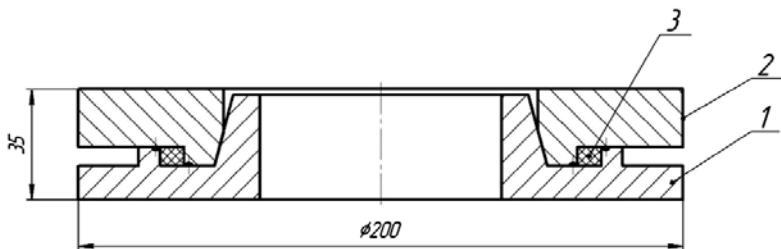


Рис. 4.1. Геометрия пресс-формы для изготовления прокладок:

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – изделие

2) *дифференциальный*, который ориентирован на получение температурного поля рабочей поверхности плиты с учётом геометрии и свойств изготавливаемых на прессе изделий;

3) *комплексный*, заключающийся в проектировании плит на основе моделирования процесса совместного нагрева плит, пресс-форм и вулканизуемых изделий.

Рассмотрим основные положения и особенности этих подходов на примере проектирования нагревательной плиты для производства резиновых прокладок (рис. 4.1). В качестве базовой конструкции используем промышленную плиту 432.383.35 размерами 600×600 мм, спроектированную и применяемую в вулканизационных прессах, 250-600 2Э и 250-600 4Э производства ЗАО "Завод Тамбовполимермаш" [3].

4.1. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД:

ПОЛУЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

При использовании данного подхода ставится задача получения равномерного температурного поля на рабочей поверхности нагревательных плит пресса, причём ассортимент выпускаемых изделий и геометрия пресс-форм во внимание не принимаются.

В некоторых случаях, согласно условиям технического задания, перепад температур по рабочей поверхности плиты не должен превышать ± 1 °С [10]. Следовательно, при необходимой температуре рабочей поверхности плиты 200 °С максимально допустимое отклонение от неё будет составлять 0,5%.

В этом случае предложенная ранее [7] постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо при заданных геометрических размерах (длине l , ширине s и высоте h) плиты; материале плиты, крышки и провода индукторов; параметрах электрической сети (напряжении U и частоте f), диаметре провода индукторов d_{ik} найти число индукторов n_i ,

длину l_k и ширину s_k каждого индуктора, координаты геометрических центров всех индукторов на плоскости плиты $[x_{c_k}; y_{c_k}]$, число витков каждого индуктора n_k , ширину b_k и глубину z_k пазов под каждый индуктор, такие, что при достижении контрольной термпарой заданной температуры расчётный температурный профиль рабочей поверхности плиты минимально отличался бы от заданного:

$$\sqrt{\frac{1}{n+m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |T_{i,j} - T_{i,j}^*|} \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

где $T_{i,j}$ – расчётная температура в точке рабочей поверхности плиты с координатами $(i \cdot hl; j \cdot hs)$, °C; $T_{i,j}^*$ – заданная температура нагрева плиты в той же точке рабочей поверхности, °C; hl, hs – дискретность заданного температурного профиля по длине и ширине плиты.

Поиск минимума функции (4.1) осуществляется при следующих ограничениях:

1) во всех указанных точках рабочей поверхности плиты расчётный температурный профиль должен отличаться от требуемого в пределах разрешенной погрешности:

$$|T_{i,j} - T_{i,j}^*| \leq \Delta T^*, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m, \quad (4.2)$$

где ΔT^* – максимально допустимое отклонение температуры на рабочей поверхности от заданной, °C;

2) разность между заданной конечной температурой нагрева плиты t^* и расчётной температурой в месте установки контрольной термпары t_k не должна превышать требуемой точности ε :

$$|t_k - t^*| \leq \varepsilon; \quad (4.3)$$

3) ограничение на среднюю суммарную мощность плиты Q_p :

$$\sum_{k=1}^{ni} Q_{i_k} \leq Q_p; \quad (4.4)$$

где Q_{i_k} – мощность k -го индуктора, Вт;

4) ограничения на размеры индукторов:

$$li_k \in [li_*; li^*], \quad si_k \in [si_*; si^*], \quad (4.5)$$

где li_* и li^* – граничные значения длины индукторов; si_* и si^* – граничные значения ширины индукторов;

5) ограничение на коэффициент мощности и КПД индукционного нагрева:

$$\cos \varphi \geq \cos \varphi_{\min} , \quad (4.6)$$

$$\eta \geq \eta_{\min} , \quad (4.7)$$

где $\cos \varphi_{\min}$, η_{\min} – минимально допустимые коэффициент мощности и КПД индукционного нагрева.

Получение равномерного поля на всей рабочей поверхности плиты имеет существенное достоинство: спроектированные таким образом плиты универсальны и подходят для выпуска широкого ассортимента РТИ. В то же время опыт эксплуатации и численные расчёты плит [7] показывают, что такой подход к проектированию нагревательных плит иногда оказывается неоптимальным по следующим причинам:

- реальный разброс температур на рабочей поверхности нагревательной плиты в лучших случаях составляет около 10 °С, зачастую превышая 15 °С;

- нарушается принцип энергосбережения, так как приходится увеличивать суммарную мощность плиты для компенсации тепловых потерь индукторов, расположенных вблизи краёв рабочей поверхности;

- пресс-формы РТИ в процессе вулканизации занимают площадь, существенно меньшую, чем вся рабочая поверхность плиты, поэтому нет смысла нагревать всю эту площадь.

Таким образом, интегральный подход целесообразно использовать главным образом в случаях использования нагревательных плит в универсальных прессах, предназначенных для формования самых различных изделий. Также отметим, что интегральный подход уместен при изготовлении продукции, имеющей соизмеримые с плитами пресса размеры (конвейерные ленты, резиношифер), а также в случае использования пресс-форм простой конфигурации для изготовления несложных изделий.

4.2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ПОДХОД: ПРИМЕНЕНИЕ ЗОННОГО ОБОГРЕВА

Применение этого подхода к проектированию нагревательных плит не требует получения равномерного температурного поля по всей рабочей поверхности. Необходимо минимизировать температурные перепады внутри определённых зон, соответствующих требуемым диапазонам размеров РТИ. Например, для выбранного типоразмера резиновых прокладок (см. рис. 4.1) за один цикл работы пресса можно разместить на рабочей поверхности нагревательной плиты четыре пресс-формы. Поэтому для оптимального проведения процесса вулканизации достаточно получения равномерного поля лишь в зонах, по-

кываемых этими четырьмя цилиндрическими пресс-формами. Такие зоны, соответствующие размерам пресс-форм изготавливаемых на прессе изделий, будем называть рабочими зонами.

В данном случае поверхность плиты можно разбить на четыре прямоугольных участка. Внутри этих участков достаточно сформировать зоны равномерного температурного поля, соответствующие размерам пресс-форм, при этом поверхность вне рабочих зон может нагреваться неравномерно. Для уменьшения тепловых потерь и снижения необходимой мощности индукторов края плиты, по возможности, следует сделать "холодными".

При использовании дифференциального подхода для проектирования индукционных нагревательных плит приведённая в разделе 1 постановка задачи будет дополнена следующим образом: на основе анализа заказа на выпускаемые РТИ требуется зонировать поверхность плиты на участки, максимально соответствующие планируемому ассортименту продукции, и обеспечить равномерность температурного поля внутри рабочих зон.

Заметим, что размеры плит прессового оборудования с одной стороны и размеры изделий и пресс-форм с другой изменяются в широких пределах. Для принятия решения о применении дифференциального подхода введём критерий оценки степени заполнения рабочей поверхности плит K_3 :

$$K_3 = \frac{S_{п.ф}}{S_{пл}^p}, \quad (4.8)$$

где $S_{п.ф} = \max\{S_{п.ф}\}_q$ – наибольшая площадь пресс-форм для данной серии изделий m^2 ; $S_{пл}^p = (l_p - p_l)(s_p - p_s)$ – площадь рабочей поверхности плиты, m^2 ; $q = 1, 2, \dots, n_{п.ф}$ – порядковый номер пресс-формы, используемой для данной серии изделий; $n_{п.ф}$ – число уникальных пресс-форм для данной серии изделий.

Использование дифференциального подхода оправданно, если в течение одного цикла работы пресса на нагревательной плите помещается минимум две пресс-формы максимальной площади. Поэтому если $0 < K_3 < 0,5$, то принимается решение об использовании дифференциального подхода, а при $0,5 < K_3 < 1$ предпочтительнее интегральный подход к проектированию плиты.

Сравним интегральный и дифференциальный подходы на примере индукционной нагревательной плиты базовой конструкции. В рассматриваемых случаях начальная температура плиты равна $20^\circ C$, конечная температура нагрева – $200^\circ C$. Материал плиты – сталь 45. Тепловой расчёт проведём согласно методике, предложенной в [7].

Суммарная мощность плиты при средней температуре нагрева составила 6500 Вт. Она имеет шесть прямоугольных индукторов, два более мощных центральных индуктора расположены ближе к краю плиты. Схема размещения индукторов на промышленном образце плиты представлена на рис. 4.2.

Отметим, что данная плита проектировалась с использованием интегрального подхода, т.е. перед конструктором первоначально ставилась задача получения равномерного температурного поля на всей рабочей поверхности плиты. Результаты теплового расчёта этой плиты представлены на рис. 4.3 и в табл. 4.1. По результатам расчёта сток тепла в воздух составил 2294 Вт.

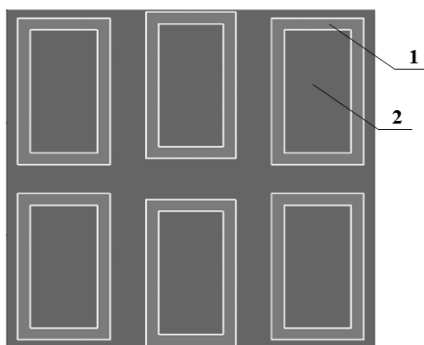


Рис. 4.2. Конфигурация индукционной нагревательной плиты базовой конструкции:

1 – индуктор; *2* – плита

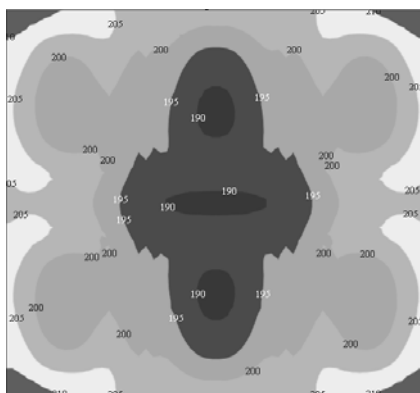


Рис. 4.3. Температурное поле рабочей поверхности плиты базовой конструкции при средней температуре 200 °C

4.1. Результаты теплового расчёта плиты базовой конструкции

Характеристика температурного поля	Значение
Время нагрева от начальной температуры (20 °С) до конечной (200 °С), с	2560
Максимальная температура, °С	211,632
Минимальная температура, °С	189,058
Максимальная разница температур по поверхности, °С	22,574
Дисперсия температуры по рабочей поверхности, °С	5,308
Среднее отклонение температуры по рабочей поверхности, °С	4,359

Анализируя данные табл. 4.1, можно сделать вывод, что полученное при использовании интегрального подхода температурное поле не удовлетворяет требованиям технического задания, так как отклонение температуры от требуемой (более 20 °С) больше допустимого. Очевидно, что для оптимизации температурного поля данную конструкцию плиты необходимо изменить.

Применим дифференциальный подход. Типоразмер пресс-форм для изготовления резиновых прокладок (рис. 4.1) соответствует квадратному участку 200×200 мм. Поэтому поставим задачу получения рабочих зон с необходимой для нагрева температурой 200 °С и перепадом температур в рабочих зонах $\pm 2,5$ °С в каждой четверти рабочей поверхности плиты. Для достижения этой цели была предложена конструкция плиты, конфигурация которой представлена на рис. 4.4. Суммарная мощность плиты при средней температуре нагрева составила 5920 Вт.

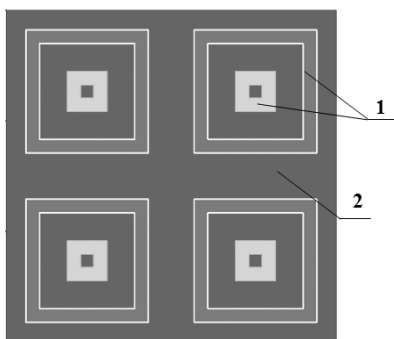


Рис. 4.4. Конфигурация нагревательной плиты 600×600 мм, для создания четырёх зон равномерного распределения температуры 200×200 мм:

1 – индукторы; 2 – плита

Она имеет восемь прямоугольных индукторов, в каждой из четырёх зон находится по два concentрических прямоугольных индуктора. При использовании той же методики расчёта были получены результаты, сведенные в табл. 4.2. Температурное поле представлено на рис. 4.5.

Как видно, за счёт изменения конструкции плиты, удалось уменьшить общую мощность плиты на 580 Вт, т.е. почти на 9%. Сток тепла в воздух в этом случае составил 2181 Вт. Таким образом, уменьшение тепловых потерь при применении дифференциального подхода по сравнению с интегральным составило около 5%.

4.2. Результаты теплового расчёта плиты, сконструированной с применением дифференциального подхода

Характеристика температурного поля	Значение
Время нагрева от начальной температуры (20 °С) до конечной (200 °С), с	3550
Максимальная температура, °С	201,812
Минимальная температура, °С	191,642
Максимальная разница температур по поверхности, °С	10,17
Дисперсия температуры по рабочей поверхности, °С	2,426
Среднее отклонение температуры по рабочей поверхности, °С	1,67

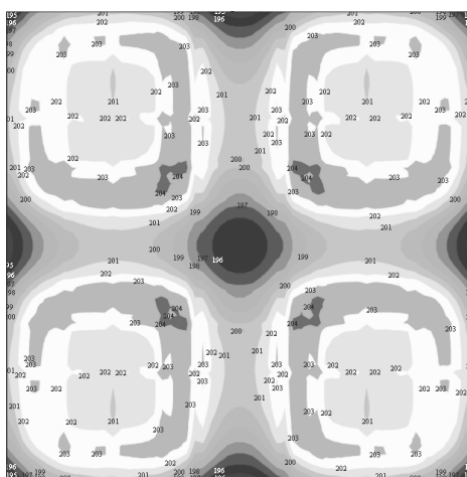


Рис. 4.5. Температурное поле поверхности плиты с четырьмя рабочими зонами 200×200 мм

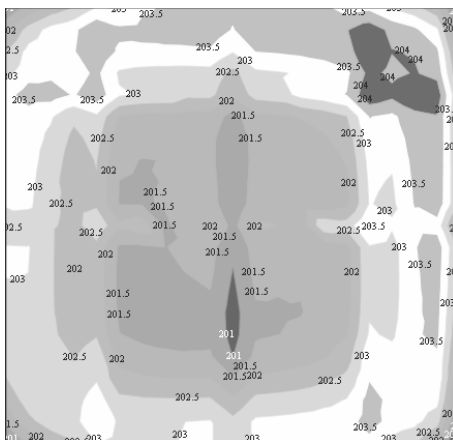


Рис. 4.6. Температурное поле рабочей зоны 200×200 мм

4.3. Результаты теплового расчёта рабочей зоны плиты при использовании дифференциального подхода

Характеристика температурного поля	Значение
Максимальная температура, °С	201,812
Минимальная температура, °С	197,413
Максимальная разница температур по поверхности, °С	4,399
Дисперсия температуры по зоне, °С	0,851
Среднее отклонение температуры по зоне, °С	0,736

Рассмотрим теперь не всю рабочую поверхность, а только одну из четырёх рабочих зон. Температурное поле этой зоны и его характеристики представлены на рис. 4.6 и в табл. 4.3.

Анализируя данные, представленные в табл. 4.2 и 4.3, можно сделать следующие выводы:

- применение дифференциального подхода к проектированию обеспечивает получение более равномерного температурного поля в пределах рабочих зон, чем при интегральном подходе;

- дифференциальный подход обеспечивает достижение энергосбережения: уменьшения суммарной мощности плиты и потерь тепла в окружающий воздух.

Отметим, что выбранный участок рабочей зоны 200×200 мм охватывает широкий диапазон других РТИ, например, манжет, колец и втулок, которые, как и рассматриваемая прокладка, используются для

комплектации насосных установок производства ЗАО "Завод Тамбов-полимермаш". То есть можно подготовить набор типовых нагревательных плит под известную номенклатуру и диапазон типоразмеров выпускаемых РТИ для любого пресса и обеспечить универсальность спроектированных нагревательных плит в рамках заданного или известного ассортимента изделий. Это позволит оперативно работать с потребителем и иметь преимущество перед другими производителями за счёт возможности применять для выпуска конкретных РТИ нагревательные плиты оптимальной конструкции.

4.3. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД: ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЛИТ С УЧЁТОМ ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРЕСС-ФОРМ И ВЫПУСКАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

В данном случае проектирование плит осуществляется с применением нестационарного теплового конечно-элементного анализа системы "плита – пресс-форма – изделие". Целью является получение заданного температурного поля в объёме изделия за счёт изменения параметров конструкции плит. Моделирование нагрева пресс-формы для изготовления прокладок на плите базовой конструкции (рис. 4.2) реализовано согласно методике, предложенной в [8].

На рисунке 4.7 изображена твердотельная геометрическая модель системы. Она состоит из следующих элементов (для наглядности элементы разнесены и включена прозрачность некоторых деталей): между нижней (основание 1, крышка 2, индукторы 3) и верхней (основание 7, крышка 8, индукторы 9) плитами располагаются пресс-формы (матрица 4, пуансон 5) для производства резиновых прокладок 6. Габариты пресс-формы позволяют разместить на рабочей поверхности плиты 600×600 мм одновременно четыре пресс-формы.

Конечно-элементный анализ системы, изображённой на рис. 4.7, реализован в среде COMSOL. Конечное время нагрева составило 2500 с, которому соответствует необходимое, согласно регламенту, среднее значение объёмных температур резиновых изделий 147 °С. Полученное в результате объёмное температурное поле системы представлено на рис. 4.8, температурное поле резиновой прокладки (поскольку рассматриваемая система симметрична, показана только одна прокладка) – на рис. 4.9.

Максимальный перепад температур по объёму моделируемой системы составил 26,9 °С. Наибольшая температура наблюдается в местах расположения двух центральных (более мощных) индукторов, так как в этих местах происходит лишь теплоотдача в окружающий воздух. Минимальная температура наблюдается в объёме изделий и на внешних боковых и торцевых поверхностях плит.

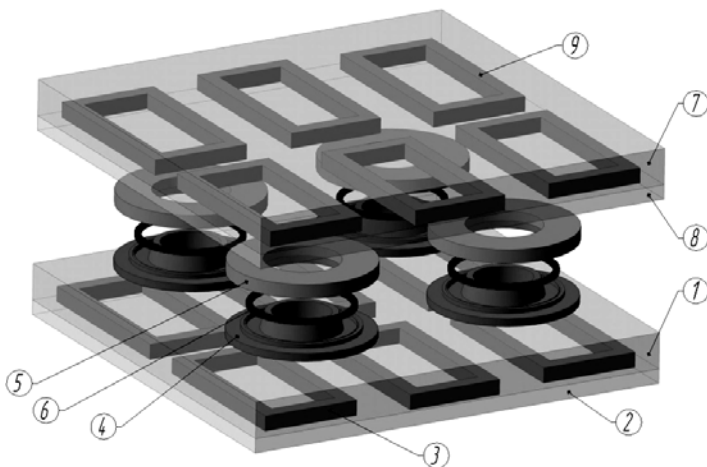


Рис. 4.7. Геометрическая модель системы

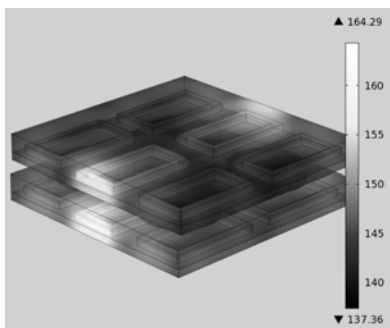


Рис. 4.8. Температурное поле системы

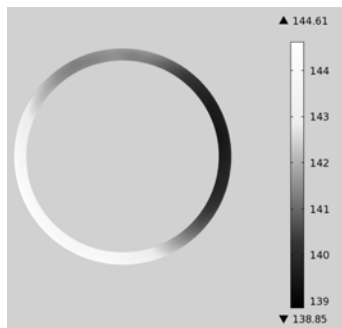


Рис. 4.9. Температурное поле продольного сечения прокладки

Как видно из рисунка 4.9, максимальный перепад температур по объёму изделия составляет 5,8 °С. Максимальная температура 144,6 °С соответствует части изделия, расположенной рядом с центральными мощными индукторами; минимальная 138,9 °С – противоположной части.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что степень неравномерности температурных полей в изделиях удовлетворительна, т.е. в оптимизации системы обогрева пресс-форм нет необходимости.

С другой стороны, из данных рис. 4.3 и табл. 4.1 следует, что с точки зрения интегрального подхода рассматриваемая плита не пригодна

для эксплуатации. Можно сделать вывод, что комплексный метод, более полно учитывающий свойства системы "плита – пресс-форма – изделие", позволяет точнее оценить пригодность спроектированной плиты для производства конкретного изделия и оптимальность её конструкции.

Следует отметить, что информация об изменении температуры в процессе вулканизации имеет исключительное значение в производстве крупногабаритных шин и РТИ [11]. По этой причине применение комплексного подхода к проектированию оборудования для производства таких изделий приобретает особое значение.

Таким образом, в каждом конкретном случае промышленного использования существующих и проектирования новых индукционных нагревательных плит следует принимать во внимание специальные требования к формируемому температурному полю в объёме нагреваемого изделия, целесообразность использования существующих технологий и ассортимент выпускаемой на прессе продукции.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Интегральный подход целесообразно использовать для комплектации нагревательными плитами универсальных прессов; при изготовлении продукции, имеющей соизмеримые с плитами пресса размеры; при использовании пресс-форм с простой конфигурацией и для изготовления простых, немассивных РТИ.
2. Применение дифференциального подхода оправдано в случае производства известного ассортимента продукции и в целях уменьшения суммарной мощности плит.
3. Использование комплексного подхода необходимо при изготовлении РТИ со сложной геометрией в массивных пресс-формах, а также в особых случаях, когда необходима информация об изменении температуры изделия в процессе вулканизации.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Сформулируйте критерий оптимальности конструкции нагревательной плиты при использовании интегрального подхода к её проектированию.
2. Сущность и область применения дифференциального подхода к проектированию нагревательных плит прессов для изготовления РТИ.
3. Физический смысл и область применения критерия оценки степени заполнения рабочей поверхности плит.
4. Почему комплексный подход к проектированию нагревательных плит прессов для изготовления РТИ на предприятиях-изготовителях практически не применяется?

5. Почему конструкция плиты, недопустимая с точки зрения интегрального подхода, может оказаться допустимой с точки зрения комплексного?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 4

1. *Каталог* продукции Тамбовполимермаш [Электронный ресурс] – URL : <http://www.tambovpolimer.ru/katalog/15>. – Загл. с экрана.

2. *Завод* Красина: выпуск оборудования для переработки резины и пластмасс [Электронный ресурс] – URL : <http://www.zavodkrasina.ru/katalog/12>. – Загл. с экрана.

3. *Пресс* гидравлический вулканизационный 250-600 (1Э, 2Э, 4Э) [Электронный ресурс] – URL : http://www.tambovpolimer.ru/katalog_id/33. – Загл. с экрана.

4. *Plate vulcanizing press products from alibaba.com* [Электронный ресурс] – URL : http://www.alibaba.com/product-gs/449198932/plate_vulcanizing_press.html. – Загл. с экрана.

5. *Plate vulcanizing press products from alibaba.com* [Электронный ресурс] – URL : http://www.alibaba.com/product-gs/488304212/rubber_vulcanizing_press.html. – Загл. с экрана.

6. *Plate vulcanizing press products from alibaba.com* [Электронный ресурс] – URL : http://www.alibaba.com/product-free/104458183/Plate_Vulcanizing_Press.html. – Загл. с экрана.

7. *Малыгин, Е. Н.* Методика теплового расчёта нагревательных плит прессов для изготовления резинотехнических изделий [Текст] / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, А. С. Крушати́н // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 11. – С. 48 – 56.

8. *Карпушкин, С. В.* Моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе [Текст] / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/2 (286). – С. 35 – 41.

9. *Солодов, А. П.* MathCAD. Дифференциальные модели [Текст] / А. П. Солодов, В. Ф. Очков. – М. : Изд-во МЭИ, 2002.

10. *Карпушкин, С. В.* Моделирование устройств индукционного нагрева на примере индукционных нагревательных плит вулканизационных прессов (на английском языке) [Текст] / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов, А. О. Глебов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 110 – 120.

11. *Машины* и аппараты резинового производства / под ред. Д. М. Барско́ва. [Текст] / – М. : Химия, 1975. – 600 с.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ ВУЛКАНИЗАЦИОННОГО ПРЕССА

В общем случае постановку задачи оптимизации индукционной нагревательной плиты вулканизационного пресса для изготовления резино-технических изделий (РТИ) можно представить следующим образом: необходимо найти такие конструктивные (число и взаимное расположение индукторов, длина, ширина и положение центра каждого индуктора) и режимные (мощность индукторов) параметры нагревательных плит пресса, которые обеспечивали бы формирование требуемого температурного поля в объёме изделия. Данную задачу можно решать двумя способами:

1. Моделирование температурных полей непосредственно в изделиях [1, 2] для минимизации перепада температур по их объёму.

2. Моделирование нагрева плиты с целью минимизации перепада температур по её рабочей поверхности [3, 4]. Данный подход основан на справедливом утверждении, что равномерное температурное поле плит будет обеспечивать равномерный прогрев элементов прессформ и, как следствие, получение равномерного температурного поля в изделиях. Отметим, что этот способ существенно упрощает исходную задачу: в расчётную модель входит только нагревательная плита, состоящая из основания, крышки и индукторов.

Результаты решения задачи оптимизации, полученные с использованием первого способа, применимы только к конкретным изделиям. Однако нагревательные плиты, как правило, предназначены для производства широкой гаммы РТИ, т.е. являются универсальными. По этой причине предлагаемая методика оптимизации параметров нагревательной плиты разработана на основе моделирования её нагрева.

Можно выделить следующие факторы, существенно осложняющие проведение оптимизации конструктивных и режимных характеристик плит:

1. Сложность физических процессов (прежде всего, электромагнитных), протекающих при индукционном нагреве ферромагнитной стали, а также большое количество воздействующих факторов [5, 6].

2. Важные для практического применения процессы нагрева являются нестационарными.

3. Для нахождения температурных полей требуется решение уравнений математической модели [3, 4], которое требует существенных затрат машинного времени. По этой причине применение методов

оптимизации, для которых необходимо многократное решение уравнений математической модели нагрева плиты, затруднительно из-за ограниченности вычислительных ресурсов и больших затрат времени на реализацию. Данный фактор усиливается большим числом оптимизируемых параметров плиты.

4. Численные расчёты показали, что конструкционные и режимные характеристики по-разному влияют на температурное поле плит, отличающихся конфигурацией, числом и расположением индукторов. Поэтому невозможно выработать универсальные рекомендации для оптимального проектирования и оценки нагревательных плит.

5.1. СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЛИТ

Предлагаемая методика, с одной стороны, адекватно учитывает влияние всех варьируемых переменных, а с другой, – универсальна для всех типов плит и индукторов. Методика включает три этапа:

1) проведение вычислительных экспериментов на детерминированной математической модели нагрева плиты в соответствии с методами планирования экспериментов;

2) построение поверхности отклика (зависимости, приближённо связывающей варьируемые переменные с критерием оптимальности) по экспериментальным данным, и проверка достоверности аппроксимации;

3) поиск значений варьируемых переменных, соответствующих экстремуму поверхности отклика.

В качестве объектов исследования рассматривались два разных вида плит – с прямоугольными и с concentрическими индукторами, используемые для производства РТИ на ЗАО "Завод Тамбовполимермаш" (рис. 5. 1).

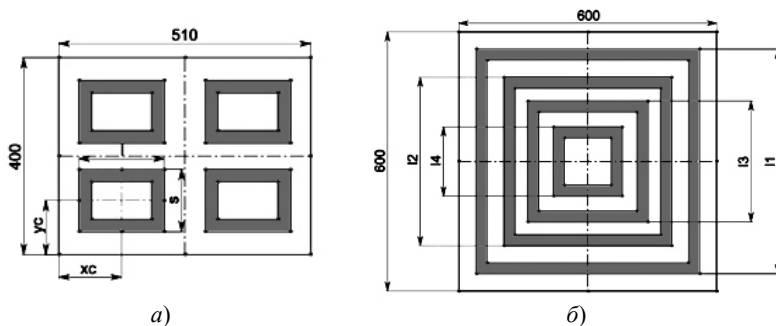


Рис. 5.1. Конструкции нагревательных плит:

a – с прямоугольными индукторами; *б* – с concentрическими индукторами

Первая нагревательная плита (рис. 5.1, а) длиной $l = 500$ мм, шириной $s = 410$ мм, высотой $h = 70$ мм имеет четыре индуктора прямоугольной формы размерами 172×127 мм в пазах сечением 25×25 мм. Средняя мощность плиты составляет 5 кВт.

Вторая нагревательная плита (рис. 5.1, б) размерами $l = 600$ мм, $s = 600$ мм, $h = 70$ мм имеет четыре концентрических индуктора квадратной формы с длиной стороны 530 мм, 375 мм, 250 мм и 110 мм в пазах сечением 25×25 мм. Средняя мощность плиты составляет 6,5 кВт.

5.2. ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении численных экспериментов выполняются следующие операции.

- *Выбор переменной состояния.* Целью оптимизации является получение на рабочей поверхности плиты равномерного температурного поля. Поэтому в качестве переменной состояния y , которая однозначно характеризует эффективность объекта, выбран перепад температур по поверхности плиты:

$$y = \Delta T = T_{\max} - T_{\min}. \quad (5.1)$$

Отметим, что возможно применение других переменных состояния, например, дисперсии или среднего отклонения от рабочей температуры по поверхности. Использование выбранной переменной предпочтительно из-за простоты вычисления, что имеет значение при проведении серии численных экспериментов.

- *Выбор факторов, влияющих на переменную состояния.* Для рассматриваемых объектов исследования выбраны следующие факторы состояния. Для плиты с прямоугольными индукторами использованы пять факторов: длина ($x_1 = l$) и ширина индуктора ($x_2 = s$), положение его центра по длине и ширине плиты ($x_3 = xc$, $x_4 = yc$ соответственно) и мощность индуктора ($x_5 = Q$). Для плиты с концентрическими индукторами использованы восемь факторов: мощности ($x_1 = Q_1$, $x_2 = Q_2$, $x_3 = Q_3$, $x_4 = Q_4$) и длины сторон ($x_5 = l_1$, $x_6 = l_2$, $x_7 = l_3$, $x_8 = l_4$) каждого индуктора.

- *Выбор интервалов варьирования факторов.* Интервалы варьирования параметрами геометрии индукторов должны обеспечивать минимальное расстояние между индукторами, а также между индуктором и краем плиты, равное ширине паза (25 мм). Значение интервальной оценки суммарной мощности плиты в каждом случае следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить нагрев плиты до рабочей температуры за заданное время.

Отметим, что область определения факторов окончательно формируется в ходе предварительных экспериментов, которые проводятся в соответствии с методикой, изложенной в [4].

- *Выбор нулевых уровней.* Центр экспериментального плана предлагается поместить в середину области определения факторов. Данный подход является универсальным для всех нагревательных плит.

- *Выбор экспериментального плана* (правила, по которому будет происходить варьирование всех факторов исследуемого объекта) осуществляется на основе методов планирования эксперимента, причём порядок плана должен быть не меньше порядка аппроксимирующей зависимости d [7]. Другими словами, нужно иметь такую систему планирования, в которой i -й фактор принимает не менее $(d + 1)$ различных значений:

$$s_i \geq d + 1. \quad (5.2)$$

- *Построение поверхности отклика:* выбор аппроксимирующей зависимости и нахождение её коэффициентов, а также проверка достоверности аппроксимации. Аппроксимация устанавливает связь между факторами и переменной состояния. Как правило, функциональная зависимость задаётся в виде полинома, который в случае двух факторов для плана первого порядка записывается в следующем виде:

$$f(x_1, x_2) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (5.3)$$

Таким образом, задача аппроксимации сводится к нахождению коэффициентов b полинома. Для аппроксимации использовался метод наименьших квадратов (МНК), суть которого заключается в минимизации суммы квадратов отклонений, т.е.

$$\Phi = \sum_{i=0}^{N-1} [y_i - f(\mathbf{X}_i, b_0, b_1, \dots, b_{m-1})]^2 \rightarrow \min, \quad (5.4)$$

где y_i – результат численного эксперимента в i -й точке; N – количество численных экспериментов; \mathbf{X} – вектор факторов, $\mathbf{X}_i = \{x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}\}$; k – число факторов; m – число коэффициентов уравнения регрессии.

При любых b_0, b_1, \dots, b_{m-1} функция $\Phi(b_0, b_1, \dots, b_{m-1})$ имеет единственный минимум, необходимым условием которого является одновременное выполнение условий

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = 0, \dots, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b_{m-1}} = 0. \quad (5.5)$$

Если слагаемые уравнения регрессии, называемые также базисными функциями, линейно независимы, то равенства (5.5) после преобразований образуют систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) порядка m [8].

- *Поиск минимума поверхности отклика.* Значения факторов, соответствующие минимуму поверхности отклика, являются решением задачи оптимизации параметров нагревательной плиты.

Ключевым фактором, от которого зависит точность восстановления неизвестной функции и решение оптимизационной задачи в целом, является выбор вида аппроксимирующей зависимости. Опыт показывает, что при её выборе, как правило, идут от простых зависимостей к сложным [9]. Поэтому проведён сравнительный анализ результатов, полученных с применением линейной, квадратичной и кубической аппроксимации, для которых использован двухуровневый полный факторный эксперимент (ПФЭ) первого порядка, трёхуровневый ПФЭ второго порядка и четырёхуровневый ПФЭ третьего порядка соответственно, см. [10]. Применение разных экспериментальных планов вызвано необходимостью выполнения условия (5.2).

На примере оптимизации конструктивных параметров нагревательной плиты с прямоугольными индукторами (четыре фактора x_1, x_2, x_3, x_4 , см. рис. 5.1, а) рассматривалось применение линейной четырёхмерной аппроксимации. Использовалась аппроксимирующая зависимость следующего вида:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i. \quad (5.6)$$

В качестве факторов эксперимента выбраны: длина ($x_1 = l$) и ширина ($x_2 = s$) индуктора, координаты его центра ($x_3 = xc, x_4 = yc$); проведён предварительный двухуровневый ПФЭ. Число расчётов составило $N = 2^4 = 16$.

Используя уравнения (5.4) – (5.6), получена СЛАУ пятого порядка:

$$b_0 \sum_{i=0}^{N-1} x_{ki} x_{0i} + b_1 \sum_{i=0}^{N-1} x_{ki} x_{1i} + b_2 \sum_{i=0}^{N-1} x_{ki} x_{2i} + b_3 \sum_{i=0}^{N-1} x_{ki} x_{3i} + b_4 \sum_{i=0}^{N-1} x_{ki} x_{4i} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i x_{ki} \quad (5.7)$$

Для решения СЛАУ вида (5.7) использован метод LU -разложения, который представляет собой модификацию метода Гаусса [11]. Идея метода заключается в представлении матрицы коэффициентов уравнений системы в виде произведения нижней треугольной матрицы L и верхней треугольной матрицы U . Главное отличие метода LU -разложения от метода Гаусса состоит в том, что вектор свободных членов уравнений при этом не изменяется.

Известно, что симметричная матрица коэффициентов системы (5.7) часто имеет очень большое число обусловленности [8]. Поэтому

при осуществлении её разложения необходимо использовать алгоритм выбора главного элемента. Отметим, что для решения плохо обусловленных СЛАУ могут быть использованы другие методы, такие как метод сингулярного разложения (SVD) [8] или метод QR -разложения [12]. Однако расчёты, см. ниже, показали, что метод LU -разложения обеспечивает высокую точность решения при относительно небольших порядках СЛАУ (менее 100).

Графически искомое уравнение регрессии вида (6) представляет собой гиперплоскость. Поверхность отклика при координатах центра индуктора $x_c = 128$ мм, $y_c = 100$ мм показана на рис. 5.2.

Для визуальной оценки достоверности аппроксимации использован график соответствия данных, полученных с помощью уравнения регрессии, результатам численных экспериментов. Координаты точек по оси абсцисс показывают значения критерия оптимальности, полученные в результате экспериментов. По оси ординат – значения аппроксимирующей функции. Таким образом, чем ближе точки к прямой, тем выше достоверность аппроксимации.

График достоверности линейной аппроксимации представлен на рис. 5.3. В точках экспериментальных планов определены отклонения по формуле

$$\Delta_i = |f(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}) - y_i|, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (5.8)$$

Максимальное отклонение результатов $\max \{\Delta\}$ составило $1,8^\circ\text{C}$.

Минимум линейной функции вида (5.6) достигается на границах области изменения факторов, однако значения критерия оптимальности в вершинах этой области известны из результатов проведения ПФЭ. Следовательно, в данном случае линейная аппроксимация для решения задачи оптимизации не имеет смысла.

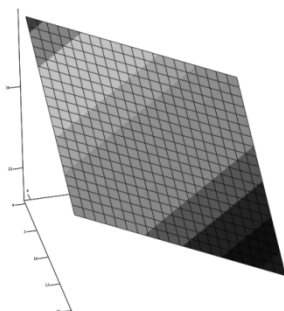


Рис. 5.2. Поверхность отклика (5.6)

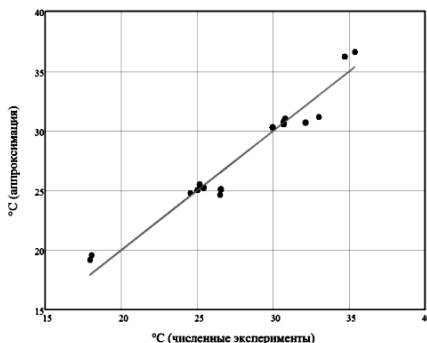


Рис. 5.3. Достоверность линейной аппроксимации

Для проведения квадратичной аппроксимации использовались результаты трёхуровневого ПФЭ. При этом число экспериментов составило $N = 3^4 = 81$. Использовалось уравнение квадратичной регрессии в виде

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 b_{ij} x_i x_j. \quad (5.9)$$

Число коэффициентов уравнения квадратичной аппроксимации m_2 составило

$$m_2 = 1 + k + \sum_{i=1}^k i. \quad (5.10)$$

При числе факторов $k = 4$ число коэффициентов $m_2 = 15$. СЛАУ формируется аналогично случаю линейной аппроксимации.

На рисунке 5.4 представлена поверхность отклика при фиксированных длине и ширине индуктора ($l = 215$ мм, $s = 170$ мм).

Изображённый параболоид имеет единственный минимум во внутренней области. Поэтому можно сделать вывод, что задание области определения координат центра индуктора на соответствующем этапе осуществлено корректно.

На рисунке 5.5 приведён график достоверности квадратичной аппроксимации. Максимальное отклонение результатов $\max\{\Delta\}$ в этом случае составило $1,7^\circ\text{C}$.

Аналогичным образом реализована кубическая аппроксимация. В соответствии с условием (5.2) использовались результаты четырёхуровневого ПФЭ. Число экспериментов составило $N = 4^4 = 256$. Использовалось уравнение регрессии вида

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 \sum_{p=j}^4 b_{ijp} x_i x_j x_p. \quad (5.11)$$

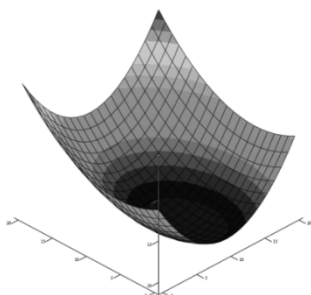


Рис. 5.4. Квадратичная поверхность отклика

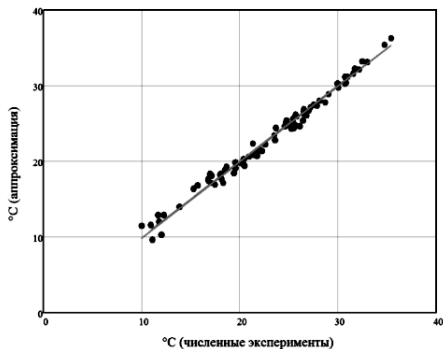


Рис. 5.5. Достоверность квадратичной аппроксимации

Число коэффициентов кубического полинома m_3 составило

$$m_3 = 1 + k + \sum_{i=1}^k i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i}^k i. \quad (5.12)$$

При числе факторов $k = 4$ число коэффициентов $m_3 = 35$.

Найденная поверхность отклика при тех же фиксированных длине и ширине индуктора изображена на рис. 5.6. Совместный анализ рис. 5.4 и 5.6 позволяет сделать вывод о том, что квадратичная и кубическая аппроксимации хорошо согласуются между собой.

График достоверности кубической аппроксимации приведён на рис. 5.7. Максимальное отклонение результатов $\max \{\Delta\}$ составило 2,2 °C.

С использованием встроенных средств системы Mathcad найдены оптимальные значения варьируемых переменных, при которых достигаются минимумы гиперповерхностей отклика. Данные, позволяющие оценить эффективность аппроксимации, сведены в табл. 5.1.

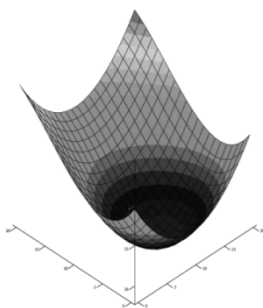


Рис. 5.6. Кубическая поверхность отклика

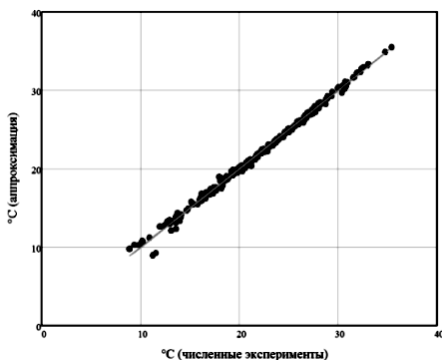


Рис. 5.7. Достоверность кубической аппроксимации

5.1. Результаты применения аппроксимаций

Тип аппроксимации	Число расчётов N	Порядок СЛАУ m	$\max \{\Delta\}$, °C	Оптимальные значения факторов, мм			
				x_c	y_c	l	s
Линейная	16	5	1,8	120	95	215	170
Квадратичная	81	15	1,7	127,9	99,4	215	170
Кубическая	256	35	2,2	127,7	99,0	212,8	170

Различия в оптимальных значениях факторов между квадратичной и кубической аппроксимациями не превышают 1%. Для кубической аппроксимации максимальное отклонение Δ выше, чем для аппроксимаций более низких порядков, что объясняется некоторой избыточностью экспериментальных данных (число расчётов N намного больше числа определяемых коэффициентов m).

В связи с этим можно сделать вывод, что для аппроксимации в данном случае целесообразнее применение полинома второго порядка, поскольку увеличение порядка не приводит к существенным изменениям результатов, а затраты машинного времени на проведение численных экспериментов возрастают более чем в три раза.

5.3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПЛАНА И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ЗАВИСИМОСТИ

Задача выбора оптимального экспериментального плана в большинстве случаев не имеет аналитического решения. Поэтому поиск оптимальных планов обычно осуществляется на основе анализа априорной информации об объекте исследования и результатов предварительных экспериментов [13]. Для проведения предварительных экспериментов выбраны (см. рис. 5.8) трёхуровневый ПФЭ, пятиуровневые ортогональные центральные композиционные планы (ОЦКП) – ограниченный и вписанный, а также трёхуровневый гранецентрированный центральный композиционный план (ГЦКП) эксперимента [10, 14]. В качестве объекта исследования на данном этапе рассматривалась только плита с прямоугольными индукторами, так как для плиты с концентрическими индукторами выбрано большее число факторов.

Результаты применения ПФЭ рассматривались в качестве базовых, поскольку этот план предполагает проведение наибольшего числа экспериментов 3^k (для плиты с прямоугольными индукторами 243 расчёта). Для остальных планов необходимо проведение $2^k + 2k + 1$ экспериментов (43 расчёта).

Как видно из рис. 5.8, "звёздные" точки ограниченного ОЦКП выходят за область определения факторов состояния, что недопустимо для выбранного способа задания интервалов варьирования факторов. Вписанный ОЦКП представляет собой масштабированный ограниченный ОЦКП таким образом, чтобы "звёздные точки" принадлежали граням гиперкуба. Вписанный ОЦКП хуже описывает поведение поверхности отклика на границе области определения факторов, поскольку не содержит точек в вершинах гиперкуба. ГЦКП лишён этих недостатков и по сравнению с ПФЭ содержит намного меньше расчётных точек. Сравнение коэффициентов аппроксимирующих функций, полученных с применением ПФЭ и ГЦКП, не выявило серьёзных отличий.

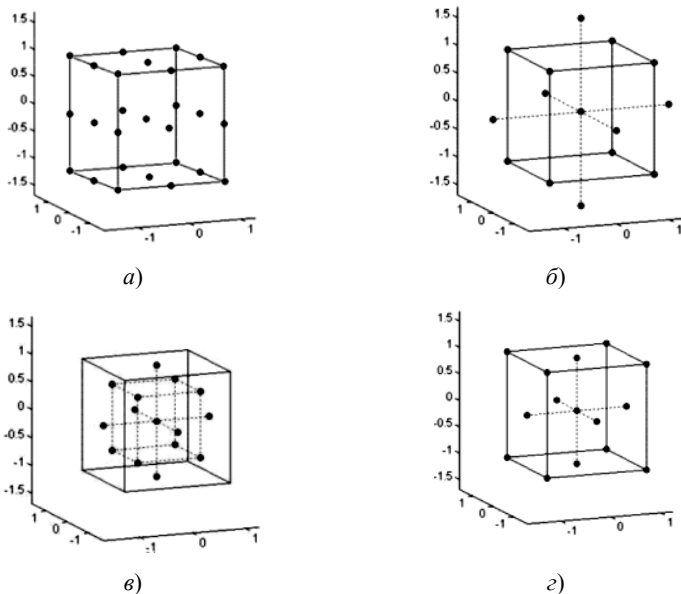


Рис. 5.8. Экспериментальные планы для трёх факторов:

a – трёхуровневый ПФЭ; *б* – ограниченный ОЦКП; *в* – вписанный ОЦКП; *г* – трёхуровневый ГЦКП

Таким образом, для проведения численных экспериментов на детерминированной математической модели нагрева плиты был выбран ГЦКП, учитывающий варьирование факторов на трёх уровнях и содержащий 2^k (вершины гиперкуба) точек "ядра" плана, одну точку в центре плана и $2k$ "звёздных" точек. Данный план позволяет построить модель в виде полинома второй степени.

Эта операция осуществляется после определения коэффициентов аппроксимирующей зависимости. Для этого используется метод регрессионного анализа результатов вычислительного эксперимента на детерминированной математической модели [13].

Вначале осуществляется построение модели среднего и её статистический анализ. Определяется среднее значение функции отклика \bar{y} и дисперсия модели среднего S^2_y , которая характеризует рассеяние результатов эксперимента относительно среднего и оценивает погрешность модели среднего:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (5.13)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \quad (5.14)$$

где y_i – значение функции отклика в i -й точке спектра плана; N – количество проведённых опытов, равное числу точек спектра плана.

Затем по аппроксимирующей функции вычисляются значения функции отклика в каждой точке спектра плана y_i^* , а также остаточная дисперсия $S_{\text{ост}}^2$, которая оценивает погрешность аппроксимации:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N - N_B} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2, \quad (5.15)$$

где N_B – число коэффициентов в аппроксимирующей зависимости.

Качество аппроксимации оценивают по критерию Фишера F и коэффициенту детерминации R^2 . Принимается следующая гипотеза H_0 : модель среднего $\bar{y}(X)$ хорошо описывает данные эксперимента. Таким образом, для доказательства достоверности аппроксимации необходимо, чтобы выдвинутая гипотеза была опровергнута.

Критерий Фишера равен отношению дисперсии модели среднего к остаточной дисперсии:

$$F = S_y^2 / S_{\text{ост}}^2. \quad (5.16)$$

Аппроксимирующая функция адекватно описывает результаты эксперимента, если найденное по формуле (5.16) значение F больше табличного значения критерия Фишера F_m , определяемого при принятом уровне значимости и числах степеней свободы k_1 и k_2 , с которыми определены дисперсии S_y^2 и $S_{\text{ост}}^2$. При этом число степеней свободы вычисляется следующим образом:

$$k_1 = N - 1, \quad (5.17)$$

$$k_2 = N - N_B. \quad (5.18)$$

Критерий детерминации определяется по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{(N - N_B)S_{\text{ост}}^2}{(N - 1)S_y^2}. \quad (5.19)$$

Значение R^2 определяет долю рассеяния экспериментальных значений функции отклика, учитываемую моделью аппроксимации. Модель считается работоспособной, если $R^2 > 0,75$.

5.4. УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА МИНИМУМА ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА

Задача поиска минимума поверхности отклика относится к классу задач поиска экстремума функций многих переменных при наличии ограничений на изменение значений факторов. Для её решения использованы метод сеток и метод прямого поиска с возвратом.

В качестве аппроксимирующей функции используется квадратичный полином. При нахождении минимума поверхности отклика для плиты с прямоугольными индукторами (рис. 5.9, *a*) в случае использования двухуровневого ГЦКП этими методами получены одинаковые результаты. Однако, как показали расчёты, предпочтительнее использовать метод прямого поиска с возвратом, так как он менее чувствителен к выбору первоначального шага поиска и требует меньших затрат машинного времени.

Численные эксперименты по исследованию влияния факторов состояния на переменную состояния проводились по методике, описанной в [3, 4]. В качестве метода решения уравнений математической модели нагрева плит использован метод конечных элементов. Выбранная методология расчётов позволяет избежать проведения сложного и трудоёмкого электромагнитного анализа. Интервалы варьирования факторов состояния приведены в табл. 5.2.

5.2. Интервалы варьирования факторов состояния

Плита	Наименование фактора	Минимальное значение	Максимальное значение
С прямоугольными индукторами	$x_1 = Q$	1100	1400
	$x_2 = l$	160	215
	$x_3 = s$	115	170
	$x_4 = xc$	95	110
	$x_5 = yc$	120	136
С концентрическими индукторами	$x_1 = Q_1, \text{ Вт}$	3210	3310
	$x_2 = Q_2, \text{ Вт}$	1440	1540
	$x_3 = Q_3, \text{ Вт}$	1090	1190
	$x_4 = Q_4, \text{ Вт}$	560	600
	$x_5 = l_1, \text{ мм}$	500	550
	$x_6 = l_2, \text{ мм}$	380	400
	$x_7 = l_3, \text{ мм}$	250	280
	$x_8 = l_4, \text{ мм}$	100	150

Предварительно в САПР SolidWorks созданы две параметризованные трёхмерные твердотельные модели плиты с прямоугольными (рис. 5.9, *а*) и с концентрическими индукторами (рис. 5.9, *б*). Поскольку рассматриваемые конструкции плит являются симметричными, то для сокращения затрат времени на численные эксперименты твердотельные модели создавались для четверти всей конструкции.

Расчёты проводились в системе инженерного анализа COMSOL с помощью расчётного модуля Heat Transfer. Целью расчётов являлось нахождение максимальной и минимальной температур рабочей поверхности плиты. В качестве реперной точки выбран временной интервал 2000 с, который для промышленных плит приблизительно соответствует времени нагрева плиты от начальной температуры окружающего воздуха до рабочей температуры плиты (около 200 °С).

График достоверности квадратичной аппроксимации для плиты с прямоугольными индукторами представлен на рис. 5.9, *а*, для плиты с концентрическими индукторами – на рис. 5.9, *б*. Все параметры, необходимые для проверки адекватности найденных аппроксимирующих зависимостей, сведены в табл. 5.3.

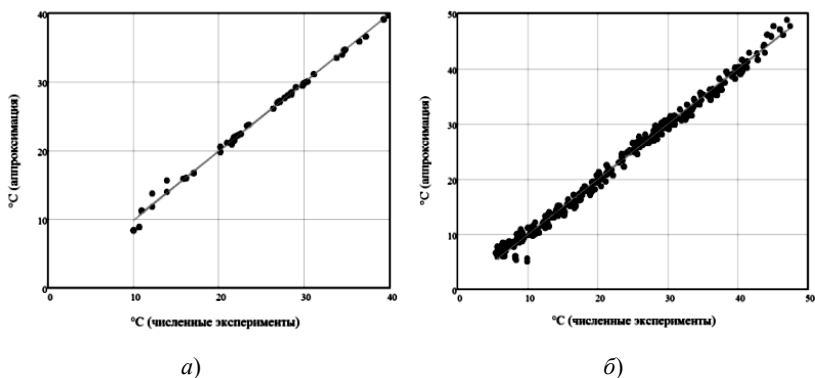


Рис. 5.9. График достоверности квадратичной аппроксимации:

а – для плиты с прямоугольными индукторами;

б – для плиты с концентрическими индукторами

5.3. Оценка адекватности аппроксимирующей зависимости

Плита	\bar{y}	S_y^2	$S_{\text{ост}}^2$	F	F_m	R^2
С прямоугольными индукторами	24,66	65,17	0,615	105,93	1,72	0,995
С концентрическими индукторами	22,92	129,65	1,216	106,62	1,15	0,992

Как видно из табл. 5.3, для обоих типов плит значение критерия Фишера F больше табличного значения F_m , значения коэффициентов детерминации R^2 близки к 1. Из этого можно сделать вывод, что аппроксимирующие функции адекватно описывают результаты вычислительного эксперимента. Кроме того, наблюдается весьма высокая сила связи между переменной состояния и факторами состояния.

Максимальное рассогласование расчётных данных и данных аппроксимации для плиты с прямоугольными индукторами составило $1,81\text{ }^\circ\text{C}$, для плиты с концентрическими индукторами – $4,71\text{ }^\circ\text{C}$.

Найденные оптимальные значения факторов состояния представлены в табл. 5.4. Значения переменной состояния (перепада температур по поверхности плиты) до и после оптимизации сведены в табл. 5.5.

5.4. Оптимальные значения факторов состояния

Плита	Наименование фактора	Начальное значение	Оптимальное значение
С прямоугольными индукторами	$x_1 = Q$, Вт	1250	1100
	$x_2 = l$, мм	172	215
	$x_3 = s$, мм	127	165
	$x_4 = xc$, мм	123	100
	$x_5 = yc$, мм	101	128
С концентрическими индукторами	$x_1 = Q_1$, Вт	3280	3276
	$x_2 = Q_2$, Вт	1505	1483
	$x_3 = Q_3$, Вт	1140	1131
	$x_4 = Q_4$, Вт	614	564,5
	$x_5 = l_1$, мм	521	550
	$x_6 = l_2$, мм	378	400
	$x_7 = l_3$, мм	250	280
	$x_8 = l_4$, мм	116	139,7

5.5. Перепад температур по поверхности плиты до и после оптимизации

Плита	До оптимизации	После оптимизации
С прямоугольными индукторами	$9,355\text{ }^\circ\text{C}$	$4,085\text{ }^\circ\text{C}$
С концентрическими индукторами	$7,691\text{ }^\circ\text{C}$	$3,587\text{ }^\circ\text{C}$

Из данных таблицы 5.5 можно сделать вывод, что проведение оптимизации для плиты с прямоугольными индукторами позволило уменьшить перепад температур в 2,3 раза, для плиты с концентрическими индукторами – в 2,1 раза.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему при оптимизации параметров нагревательной плиты вулканизационного пресса использована математическая модель температурного поля на рабочей поверхности плиты, а не в объёме вулканизируемого резинотехнического изделия?

2. Перечислите основные этапы предложенной методики оптимизации параметров нагревательных плит.

3. Почему линейная аппроксимация критерия оптимальности для решения задачи оптимизации параметров нагревательной плиты не имеет смысла?

4. Как оценивается достоверность аппроксимации критерия оптимальности по результатам численных экспериментов?

5. Каков физический смысл критерия Фишера?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

1. *Карпушкин, С. В.* Моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе [Текст] / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2011. – № 2/2(286). – С. 35 – 41.

2. *Карпов, С. В.* Оценка эффективности пресс-форм для изготовления резинотехнических изделий и системы их обогрева на вулканизационном прессе [Текст] / С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* – 2012. – № 3. – С. 10 – 16.

3. *Малыгин, Е. Н.* Методика теплового расчёта нагревательных плит прессов для изготовления резинотехнических изделий [Текст] / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, А. С. Крушатин // *Химическая промышленность сегодня.* – 2009. – № 11. – С. 48 – 56.

4. *Карпушкин, С. В.* Моделирование устройств индукционного нагрева на примере индукционных нагревательных плит вулканизационных прессов (на английском языке) [Текст] / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов, А. О. Глебов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета.* – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 110 – 120.

5. Буль, О. Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / О. Б. Буль. – М. : Издательский центр "Академия", 2006. – 288 с.

6. Кувалдин, А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали [Текст] / А. Б. Кувалдин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

7. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем [Текст] / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.

8. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений [Текст] / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. – М. : Мир, 1980. – 276 с.

9. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: исследование зависимостей : справ. изд. [Текст] / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин ; под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 487 с.

10. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения, примеры и задачи) [Текст] / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – М. : Издательское объединение "Высшая школа", 1976. – 184 с.

11. Форсайт, Дж. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений [Текст] / Дж. Форсайт, К. Молер. – М. : Мир, 1969. – 167 с.

12. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов [Текст] / Ч. Лоусон, Р. Хенсон ; пер. с англ. – М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 232 с.

13. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник для вузов [Текст] / В. П. Тарасик. – Мн. : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.

14. *DesignXplorer* [Электронный ресурс] – URL : www1.ansys.com/customer/content/documentation/130/wb_dx.pdf.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ, ИНВАРИАНТНОЕ К ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Решение разнообразных задачи размещения (компоновки) объектов в пространстве часто требуется в различных областях человеческой деятельности. К таким задачам относятся, например, планировка дачного участка (где и какие деревья и кустарники посадить), создание проекта городского строительства (где и какие здания строить), создание проекта цеха химического или машиностроительного предприятия (где и какие аппараты или станки надо разместить).

Общим в перечисленных задачах является то, что имеется набор сущностей (объектов), которые надо разместить (деревья, здания, аппараты, станки) и имеется набор сущностей (объектов), в которых размещаются первые (территория дачного участка или города, помещения химического или машиностроительного предприятия).

Размещаемые объекты и объекты, в которых происходит размещение, обладают определёнными характеристиками или свойствами (размеры, назначение, категория).

Объект считается размещённым, если однозначно определено его положение в пространстве. Это могут быть координаты некоторой характерной точки объекта, например, координаты центра ствола дерева на земле или координаты диагональных углов длинного объекта.

На возможные координаты размещаемых объектов накладываются ограничения, например, минимальное расстояние от ствола высокорослого дерева до границы соседнего участка на даче 4 м, расстояние между домами в строительстве при наличии окон в противоположно расположенных зданиях не может быть меньше 15 м, тяжёлое оборудование надо размещать на нижних этажах и др. Эти ограничения содержатся в нормативных документах: СНиП (сборники нормативов и правил), ПБ (правила проектирования безопасных технических объектов) и другие, которые определены в каждой предметной области.

При наличии опыта, человек (проектировщик), занимающийся размещением, может дополнительно накладывать свои ограничения, которых нет в нормативных документах. Кроме того, существует, по крайней мере, одно ограничение общего характера – это непересечение размещаемых объектов друг с другом.

В случае, если существует много вариантов размещения, то выбор наилучшего осуществляется с использованием некоторого критерия

предпочтения (критерия оптимизации), например, максимум освещённой солнцем поверхности под огород, минимум стоимости монтажа оборудования, минимум стоимости соединительных трубопроводов и др.

В работах [1, 2] представлены аналитические и процедурные модели, позволяющие находить оптимальные компоновочные решения оборудования химических производств. В качестве критерия оптимальности предлагается использовать критерий приведённых затрат, включающий в себя капитальные и эксплуатационные затраты, зависящие от принимаемых компоновочных решений (затраты на строительные конструкции, монтаж оборудования, трубопроводную арматуру, электроэнергию, затрачиваемую на транспортировку веществ и др.).

В настоящее время существует ряд программных средств, предназначенных для:

- ландшафтного дизайна: Наш Сад 9.0 Рубин (Dicomp), Sierra Land Designer 3D 7.0 (ActiVision), Home and Landscape Design (PUNCH!);

- автоматизации инженерного проектирования объектов промышленности: PDS (Intergraph), PDMS (AVEVA), CADPIPE (Orange Technologies), CADWORX (COADE), AutoPLANT (Bentley), PLANT-4D (CEA Technology), ABS (Autodesk);

- универсальные программы, например, SketchUp (Google).

Эти программы обладают мощным графическим интерфейсом, множеством инструментов для ручного проектирования, базами данных элементов (деревья, строительные конструкции, арматура). Однако в них отсутствуют ограничения, которые определены нормативными документами или отсутствует возможность проектировщику самостоятельно добавлять новые ограничения, что не позволяет решать оптимизационные задачи размещения в автоматическом (или с минимальным участием человека) режиме.

Между тем, принципиальная общность перечисленных задач размещения позволяет создать такую автоматизированную систему, которая может настраиваться пользователем на конкретную предметную область: ландшафтный дизайн, градостроительство или проектирование промышленных предприятий. Основным компонентом этой системы является база ограничений.

В настоящем разделе рассмотрены инвариантные к предметной области:

- представление ограничений в задачах размещения на языке SQL;
- структура базы для хранения ограничений;
- способы обработки базы данных с целью ответа на запросы о соблюдении ограничений предметной области при размещении объектов.

Область применения – разработка программного обеспечения автоматизированных систем, предназначенных для решения компо-

вочных задач промышленности, градостроительства, ландшафтного дизайна и др.

В качестве программно-независимого способа представления информационных объектов выбран N-ориентированный гиперграф. Ограничения представляются продукционными правилами вида "если А, то В". В качестве базового программного обеспечения использована реляционная база данных. Продукции (правила) представлены теоретико-множественным описанием и описанием на языке структурированных запросов Transact SQL (релиз SQL фирмы Microsoft).

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ N-ОРИЕНТИРОВАННОГО ГИПЕРГРАФА

Обозначим N-ориентированный гиперграф [3] $G(X, U)$, где $X = \{x_i\}, i = \overline{1, I}$ – множество вершин гиперграфа; x_i – i -я вершина; $U = \{u_m(X1_m)\}, m = \overline{1, M}$ – множество рёбер гиперграфа; $u_m(X1_m)$ – m -е ребро гиперграфа; $X1_m$ – множество вершин инцидентных m -му ребру $X1_m \subseteq X, X1_m = \{x_k^{\bar{l}}\}, \forall k \in K_m, K_m \subseteq \overline{1, I}; \bar{l}$ – номер вершины в ребре ориентированного гиперграфа представляет собой вектор, $\bar{l} = \{l_n\}, n = \overline{1, N}$ размерностью N . В общем случае номер вершины в ребре не обязательно должен иметь значение номера по порядку и может отражать определённое свойство вершины, которое принимает конкретное значение при включении вершины в ребро. При этом предполагается, что все вершины в рёбрах имеют одинаковый набор свойств. Например, при решении задачи размещения элементов в пространстве элементы имеют одинаковые наборы свойств, а именно, координаты элементов.

Требование одинакового набора свойств элементов существенно сужает область прикладных задач. Каждый элемент реальной технической системы обладает собственным набором свойств, который отличается от наборов свойств других элементов, например, каждый размещаемый аппарат имеет собственный набор размеров (для горизонтального ёмкостного аппарата – это диаметр и длина, для вертикально-го – диаметр и высота)

Обозначим $S = \{s_j\}, j = \overline{1, J}$ – множество всех возможных свойств вершин и рёбер: $SX_i = \{s_{r1}\} \subset S, i = \overline{1, I}, r1 \in J1_i \subset \overline{1, J}$ – множество свойств i -й вершины; $SU_m = \{s_{r2}\} \subset S, m = \overline{1, M}; r2 \in J2_m \subset \overline{1, J}$ – множество свойств m -го ребра. Под свойством здесь понимается контейнер для хранения значения свойства. Например,

свойство "вес аппарата" может иметь значение 25 000 кг. Таким образом, для каждой вершины множество её номеров $\overline{L} = \{l_n\}, n = \overline{1, N}$ заменяется множеством свойств $SX_i, i = \overline{1, I}$. Кроме того каждому ребру $u_m(X1_m)$ так же ставится в соответствие свой набор свойств $SU_m, m = \overline{1, M}$.

Каждое свойство может иметь значения из определённого множества, например, масса аппарата – это числовые значения больше нуля, группа аппарата в зависимости от расчётного давления, температуры стенки и характера среды принимает значения 1, 2, 3, 4, 5а, 5б (ПБ 03-584–03 Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных), а категория помещения по взрывопожарной и пожарной опасности – А, Б, В1, В2, В3, В4, Г, Д (Нормы пожарной безопасности НПБ 105–03). Обозначим $Z_j = \{z_{j,t}\}, t = \overline{1, T_j}$ множество возможных значений свойства s_j .

Обозначим $z[s_j, x_i] \in Z_j$ – значение свойства s_j вершины x_i . Значение свойства s_j ребра u_m обозначим $z[s_j, u_m] \in Z_j$. Введём Θ – логический оператор, один из элементов множества $\Omega = \{=, \neq, <, >, \leq, \geq\}, \Theta \in \Omega$. Запись $z[s_{j1}, x_{i1}] = z_{j1, i1}$ обозначает, что значение свойства s_{j1} для вершины x_{i1} равно $z_{j1, i1}$ (или принимает значение $z_{j1, i1}$). Запись $z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta z_{j1, i1}$ означает, что значение свойства s_{j1} для вершины x_{i1} находится в определённом отношении со значением $z_{j1, i1}$, причём это отношение ограничено элементами множества $\Omega = \{=, \neq, <, >, \leq, \geq\}$.

6.2. СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ N-ОРИЕНТИРОВАННОГО ГИПЕРГРАФА

Здесь и далее в качестве примера используется компоновка химического оборудования, только потому, что эта предметная область более известна авторам, чем, например, градостроительство. Кроме того, предполагается, что размещение аппаратов осуществляется в два этапа [1, 2]. На первом этапе определяется этаж или помещение, в котором будет размещён аппарат, на втором – координаты аппарата на этаже.

Подобная двухуровневая декомпозиция исходной задачи не сужает область применения, так как и в других предметных областях она присутствует, например, разделение участка на сад и огород или груп-

пировка станков по отделениям (токарное, фрезерное). Теоретически можно предложить N-уровневую декомпозицию, однако для реальных практических задач двухуровневой декомпозиции вполне достаточно.

Структура базы данных для хранения описанного выше N-ориентированного гиперграфа представлена на рис. 6.1.

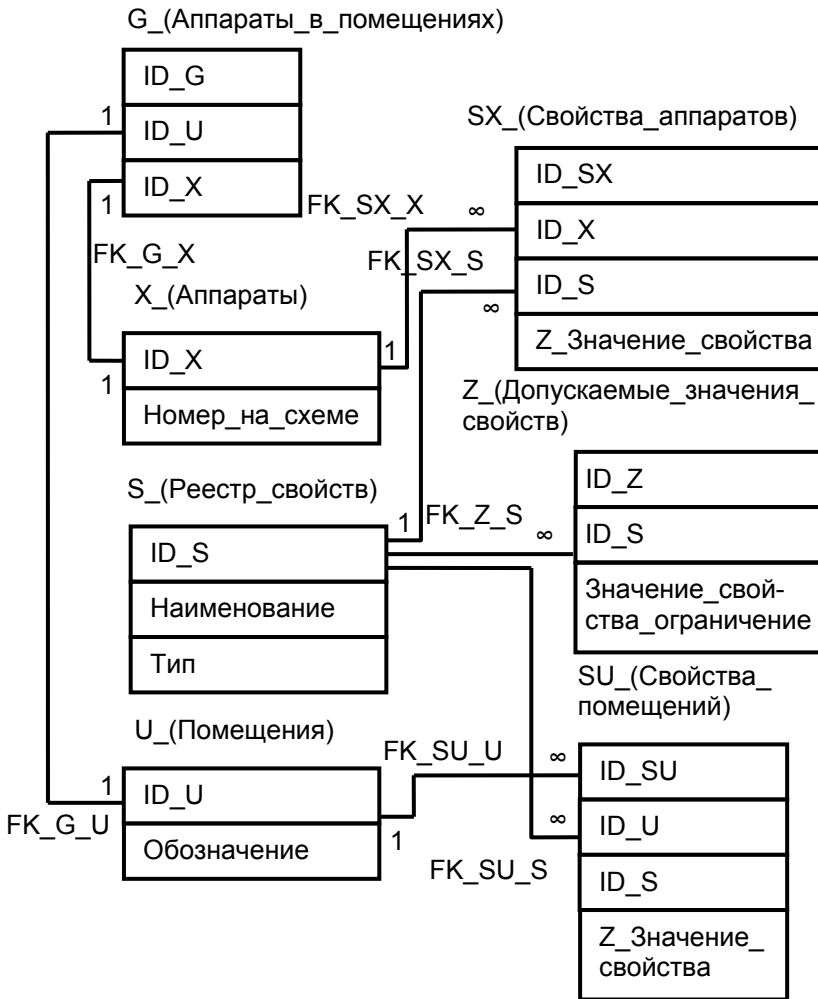


Рис. 6.1. Структурная схема базы данных для хранения N-ориентированного гиперграфа

Имена таблиц соответствуют именам введенных ранее множеств X, U, G, S, SX, SU, Z . Текст в именах таблиц после подчёркивания следует рассматривать, как комментарий, например, действительное имя таблицы $G_{(Аппараты_в_помещениях)}$ будет G . Поле $Z_{Значение_свойства}$ в приведённых ниже примерах обозначено, как Z .

Поле S . Тип позволяет различать два типа свойств:

Тип 1. Свойства, которые могут иметь бесконечное множество значений. Они вводятся вручную, например, масса аппарата, объём аппарата, температура среды в аппарате. Таблица Z для них будет содержать ограничение на допустимое значение свойства, например, значение массы аппарата всегда больше нуля.

Тип 2. Свойства, значения которых ограничено конечным списком, например, для свойства "категория помещения" список возможных значений – А, Б, В1, В2, В3, В4, Г, Д. Этот список будет содержаться в таблице Z .

Таблица Z позволяет поддерживать доменную целостность базы. Ссылочная целостность поддерживается первичными ключами по полям $X.ID_X, U.ID_U, S.ID_S, Z.ID_Z, SU.ID_SU, SX.ID_SX$ и внешними ключами, наименование которых на рисунке 1 имеет префикс FK. Кроме того, для сохранения доменной целостности базы необходимо создать уникальные индексы по полям:

- $SX.ID_X, SX.ID_S$ и $SU.ID_U, SU.ID_S$, конкретное свойство вершины или ребра присутствует в таблице SX или SU один раз;
- $G.ID_U$, конкретное ребро в графе может быть один раз;
- $G.ID_X$, аппарат не может находиться одновременно в разных местах.

Представленная на рис. 6.1 структура базы данных упрощена. Строго говоря, таблицы SX и SU следует дополнить полем ID_Z для хранения первичного ключа свойств типа 2 (поле $Z.ID_Z$). Это усложнит приведённое ниже изложение, но никак не повлияет на суть предлагаемого подхода.

Свойства вершин и свойства рёбер дополнительно можно разделить на следующие группы:

- 1) свойства вершины, которые не зависят от её принадлежности ребру (масса аппарата, размеры);
- 2) свойства ребра, которые не зависят от вершин этого ребра (номер этажа, размеры помещения);
- 3) свойства ребра, зависящие от вершин этого ребра (категория помещения в зависимости от свойств аппаратов, находящихся в помещении);
- 4) свойства вершины, зависящие от её принадлежности ребру (координаты аппарата в конкретном помещении);

5) свойства вершины, зависящие от собственных свойств или свойств других вершин (при размещении однотипных аппаратов в ряд, после установки первого аппарата определена одна из координат (x или y) всех остальных аппаратов ряда;

6) свойства ребра, зависящие от собственных свойств, или свойств других рёбер.

Свойства первой и второй группы являются исходными данными и вводятся до начала процесса размещения. Свойства третьей, четвёртой, пятой и шестой групп определяются в процессе размещения.

Представленная классификация свойств необходима для дальнейшей программной реализации способов их определения. Предполагается, что свойства третьей, четвёртой, пятой и шестой групп в начальный момент содержатся в таблицах SX и SU и имеют значения NULL, т.е. в процессе решения задачи эти свойства не добавляются, а редактируются, точнее редактируется их значение (поле Z_Значение_свойства).

6.3. ФУНКЦИИ БАЗЫ ОГРАНИЧЕНИЙ

Под базой ограничений здесь понимается программно-информационный модуль, который в процессе решения задачи размещения должен отвечать на определённые запросы, поступающие из внешней программы, которая решает задачу размещения. Ответ на запросы база ограничений осуществляет, используя хранящуюся в ней информацию. Структура этой информации инвариантна предметной области. Смысловое содержание определяется предметной областью.

В качестве "внешней программы" может выступать и проектировщик, который расставляет объекты "вручную". База ограничений должна предупредить его о возможных ошибках. Например, если проектировщик разместил тяжёлый аппарат не на первом этаже, база ограничений должна сообщить ему, что здесь аппарат размещать нельзя, так как существует правило, согласно которому, тяжёлые аппараты следует размещать на первом этаже.

Поскольку осуществлена двухуровневая декомпозиция исходной задачи, возможные запросы управляющей программы и ответы базы ограничений также классифицируем по двум уровням. Подобная классификация необходима для представления возможных запросов в SQL-нотации. Возможны следующие запросы управляющей программы на первом уровне:

Тип 1. Исходные данные – помещение и аппарат. Ответ – можно или нельзя размещать аппарат в помещении.

Тип 2. Исходные данные – аппарат. Ответ – список помещений, куда ставить аппарат можно.

Тип 3. Исходные данные – помещение. Ответ – список аппаратов, которые необходимо ставить в этом помещении можно.

Тип 4. Исходные данные – аппарат. Ответ – список помещений, куда ставить аппарат нельзя.

Тип 5. Исходные данные – помещение. Ответ – список аппаратов, которые ставить в этом помещении нельзя.

Ответы на перечисленные запросы выдаются на основании правил (ограничений), которые связывают свойства вершин и свойства рёбер. Часть этих свойств не зависит от решаемой задачи (свойства группы 1 и 2), другие (группы 3 – 6) изменяются или определяются в процессе решения задачи. Таким образом, кроме ответа на перечисленные выше запросы, база ограничений должна "уметь" изменять (или определять) свойства вершин и рёбер в зависимости от своего текущего состояния, получаемого в процессе размещения. Текущее состояние определяется значениями полей G.ID_U, G.ID_X (принадлежность аппаратов помещениям), SX.ID_S, SX.Z (свойства аппаратов), SU.ID_S, SU.Z (свойства помещений) на определённом итерационном этапе решения задачи размещения.

Далее рассматриваются только правила первого уровня. Решение задачи второго уровня (размещение аппаратов на этаже) можно свести к задаче первого уровня, если всё пространство этажа разделить на зоны (рёбра) со своими свойствами. Например, для задачи размещения технологического оборудования такими зонами являются типовые строительные клетки размером 6×6 метров (участок между колоннами).

6.4. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ В SQL-НОТАЦИИ

Введём понятия ограничения на значение свойства s_{j1} вершины x_{i1} (например, ограничение на массу аппарата) и ограничения на значение свойства s_{j2} ребра u_{m1} (например, ограничение на номер этажа помещения).

6.4.1. Ограничение на значение свойства вершины

$$z[s_{j1}, x_{i1}] \ominus z_{j1, i1}, z_{j1, i1} \in Z_j, j1 \in J1 \subset J, i1 \in I, i1 \in \overline{1, T_{j1}}. \quad (6.1)$$

Запишем проверку ограничения (6.1) для заданной вершины в SQL-нотации. Будем считать, что заданы @ID_X (вершина), @ID_S (свойство вершины) и @z (значение свойства), которые соответствуют x_{i1} , $j1$, $z_{j1, i1}$ в выражении (6.1):

exists (select * from SX
 where SX.ID_X=@ID_X and SX.ID_S=@ID_S
 and SX.Z Θ @z1. (6.2)

Запишем выбор всех вершин, удовлетворяющих условию (6.1):

select * from X where exists (select * from SX
 where X.ID_X=SX.ID_X and SX.ID_S=@ID_S
 and SX.Z Θ @z). (6.3)

Введём понятие элементарного ограничения на свойства вершины $Ox1(x)$, такое что

$Ox1(@ID_X) \equiv$ exists (select * from SX where SX.ID_X=@ID_X
 and SX.ID_S=@ID_S and SX.Z Θ @z),

$Ox1(X.ID_X) \equiv$ exists (select * from SX where SX.ID_X=X.ID_X
 and SX.ID_S=@ID_S and SX.Z Θ @z).

С учётом введённого $Ox1(x)$ выражение (6.2) запишется, как $Ox1(@ID_X)$, выражение (6.3), как select * from X where $Ox1(X.ID_X)$.

6.4.2. Ограничение на значение свойства ребра

$z[s_{j_2}, u_{m_1}] \Theta z_{j_2, t_2}, z_{j_2, t_2} \in Z_{j_2}, j_2 \in J_2 \subset J, m_1 \in M, t_2 \in \overline{1, T_{j_2}}. (6.4)$

Запишем проверку ограничения (6.4) для заданной вершины в нотации SQL. Заданы @ID_U, @ID_S, @z2, которые соответствуют m_1, j_2, z_{j_1, t_1} в выражении (6.4):

exists (select * from SU
 where SU.ID_U=@ID_U and SU.ID_S=@ID_S
 and SU.Z Θ @z). (6.5)

Запишем выбор всех рёбер, удовлетворяющих условию (6.4):

select * from U where exists (select * from SU
 where U.ID_U=SU.ID_U and SU.ID_S=@ID_S
 and SU.Z Θ @z). (6.6)

По аналогии с $Ox1(x)$ введём обозначение $Ou1(u)$ такое, что

$Ou1(@ID_U) \equiv$ exists (select * from SU where U.ID_U=@ID_U and
 SU.ID_S=@ID_S and SU.Z Θ @z),

$Ou1(U.ID_U) \equiv \text{exists (select * from SU where SU.ID_U=U.ID_U and SU.ID_S=@ID_S and SU.Z } \Theta @z).$

С учётом введённого $Ou1(u)$ выражения (6.5) и (6.6) запишутся, как $Ou1(@ID_U)$ и $\text{select * from U where } Ou1(U.ID_U).$

6.4.3. Комбинации ограничений

Введём функцию $F1(z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1})$, соединяющую логическим "И" несколько элементарных ограничений одной вершины

$$F1(z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1}) = \bigcap_{r1=1}^{R1} (z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1}), \quad j1 \in J1 \subset J, \\ i1 \in I, \quad r1 = \overline{1, R1}, \quad z_{j1, t1} \in Z_{j1}, \quad t1 \in \overline{1, T_{j1}}, \quad (6.7)$$

где $J1$ – множество свойств, соединяемых ограничений; $R1$ – количество соединяемых ограничений. Для упрощения в дальнейшем $F1(z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1})$ обозначим $F1()$.

Рассмотрим пример комбинации двух ограничений вершины – "среда в аппарате взрывоопасна и токсична". Для удобного представления в базе данных запишем эти ограничения в виде "свойство вершины взрывоопасность среды=Да И свойство вершины токсичность среды=Да".

Пусть для свойств "взрывоопасность среды в аппарате" $ID_S=10$, "токсичность среды в аппарате" $ID_S=11$, тогда в выражении (6.7) $J1 = \{10, 11\}$, $R1 = 2$, Θ_1 и Θ_2 соответствуют знаку =. Таким образом, для рассматриваемого примера

$$F1() = (z[s_{10}, x_{i1}] = "Да") \text{ И } (z[s_{11}, x_{i1}] = "Да"), \quad i1 \in I. \quad (6.8)$$

Запишем проверку условия (6.8) для аппарата $@ID_X$ в SQL-нотации:

$$OOx(@ID_X) \equiv Ox1(@ID_X) \text{ and } Ox2(@ID_X),$$

где $OOx(@ID_X)$ – комбинация ограничений вершины; $Ox1(@ID_X) \equiv \text{exists (select * from SX where SX.ID_X=@ID_X and SX.ID_S=10 and SX.Z="Да")}$, $Ox2(@ID_X) \equiv \text{exists (select * from SX where SX.ID_X=@ID_X and SX.ID_S=11 and SX.Z="Да")}$.

Поиск всех аппаратов, удовлетворяющих условию (6.8), запишется как

select * from X where OOx(X.ID_X),

где $OOx(X.ID_X) \equiv O_{x1}(X.ID_X)$ and $O_{x2}(X.ID_X)$, $O_{x1}(X.ID_X) \equiv \text{exists}(\text{select * from SX where SX.ID_X=X.ID_X and SX.ID_S=10 and SX.Z="Да"})$, $O_{x2}(ID_X) \equiv \text{exists}(\text{select * from SX where SX.ID_X=X.ID_X and SX.ID_S=11 and SX.Z="Да"})$.

В общем случае $F1()$, $j1 \in J1 \subset J$, $i1 \in I$, $r1 = \overline{1, R1}$, в SQL-нотации запишется в виде

$$OO_{x1}(x) \equiv O_{x1}(x) \text{ and } O_{x2}(x) \dots \text{ and } O_{xr}(x) \dots \text{ and } O_{xR1}(x). \quad (6.9)$$

По аналогии с $F1()$ введём функцию $F2() = F2 \times (z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_{r2} z_{j2})$, соединяющую логическим "И" несколько элементарных ограничений одного ребра:

$$F2() = \bigcap_{r2=1}^{R2} (z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_{r2} z_{j2, t2}), \quad j2 \in J2 \subset J, \quad m1 \in M, \quad r2 = \overline{1, R2},$$

$$z_{j2, t2} \in Z_{j2}, \quad t2 \in \overline{1, T_{j2}}, \quad (6.10)$$

где $J2$ – множество свойств, соединяемых ограничений; $R2$ – количество соединяемых ограничений.

В общем случае $F2()$, $j2 \in J2 \subset J$, $m1 \in M$, $r2 = \overline{1, R2}$, $z_{j2, t2} \in Z_{j2}$, $t2 \in \overline{1, T_{j2}}$ в SQL-нотации запишется в виде

$$OO_{u1}(u) \equiv O_{u1}(u) \text{ and } O_{u2}(u) \dots \text{ and } O_{ur}(u) \dots \text{ and } O_{uR2}(u). \quad (6.11)$$

Введём функцию $F3(F1(z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1}))$, соединяющую логическим И группы ограничений разных вершин:

$$F3(F1()) = \bigcap_{\forall i1 \in I1} F1_{i1}(z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1}) = \bigcap_{\forall i1 \in I1} \bigcap_{r1=1}^{R1_{i1}} (z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1})$$

$$j1 \in J1_{i1} \subset J, \quad i1 \in I1 \subset I, \quad r1 = \overline{1, R1_{i1}}, \quad z_{j1, t1} \in Z_{j1}, \quad t1 \in \overline{1, T_{j1}}, \quad (6.12)$$

где $I1$ – множество, соединяемых вершин; $J1_{i1}$ – множество соединяемых свойств вершины $i1$; $R1_{i1}$ – количество соединяемых ограничений вершины $i1$.

Запишем проверку истинности выражения (6.12) в SQL-нотации:

$$OOOx \equiv \text{exists}(\text{select * from X where OOx1(ID_X)}) \text{ and}$$

$$\text{exists}(\text{select * from X where OOx2(ID_X)}) \text{ and}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\text{exists}(\text{select * from X where OOxI1(ID_X)}). \quad (6.13)$$

6.5. ПРАВИЛА, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ ВЕРШИНЫ РЕБРУ

Правила (ограничения) первого уровня декомпозиции, которые определяют принадлежность вершины ребру можно разделить на три группы:

- правила первого рода: принадлежность вершины ребру определяется одним свойством вершины и одним свойством ребра;
- правила второго рода: принадлежность вершины ребру определяется группой свойств вершины и группой свойств ребра;
- правила третьего рода: принадлежность одной вершины ребру определяется принадлежностью ребру другой вершины.

6.5.1. Правила первого рода

Принадлежность вершины x_{i1} ребру u_{m1} , $x_{i1} \in X1_m$ определяется одним свойством s_{j1} вершины x_{i1} и свойством s_{j2} ребра. Например, если масса аппарата $> 100\,000$ кг, то аппарат следует располагать на первом этаже:

$$\begin{aligned}
 z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_1 z_{j1, i1} \wedge x_{i1} \in X1_{m1}, m1 \in M, z_{j1, i1} \in Z_{j1}, j1 \in J1 \subset J, \\
 i1 = \overline{1, T_{j1}}, i1 \in I, m1 \in M \Rightarrow z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_2 z_{j2, i2}, \\
 j2 \in J2 \subset J, z_{j2, i2} \in Z_{j2} \quad i2 = \overline{1, T_{j2}}. \quad (6.16)
 \end{aligned}$$

Представим синтаксис запросов типа (6.1) – (6.3), основанных на правилах (6.16) в нотации SQL. Синтаксис запросов типов (6.4) и (6.5) достаточно легко получается из запросов типа (6.2) – (6.3) отрицанием ограничений.

Заданы @ID_S1 – j1 свойство вершины, @z1 – $z_{j1, i1}$ значение свойства вершины, @ID_S2 – j2 свойство ребра, @z2 – $z_{j2, i2}$ – значение свойства ребра.

Тип 1. Ответ на вопрос можно ли размещать аппарат @ID_X в помещении @ID_U.

Введём переменную @ret = 1, если аппарат в заданном помещении располагать можно, @ret = 0, в противном случае:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } O_{x1}(@ID_X) \\
 & \text{if } O_{u1}(@ID_U) \\
 & \quad \text{set } @ret=1
 \end{aligned} \quad (6.17)$$

else set @ret=0.

Тип 2. Получить все помещения, в которых можно размещать аппарат @ID_X:

If Oxl(@ID_X) select ID_U from U where Ou1(U.ID_U). (6.18)

Тип 3. Получить список аппаратов, которые необходимо ставить в помещении @ID_U:

if Ou1(@ID_U) select ID_X from X where Oxl(ID_X). (6.19)

Представленное разделение запросов на типы позволяет ввести правило один раз и автоматически сформировать рассмотренные конструкции запросов. Рассмотрим это на следующем примере.

Правило: *если масса аппарата > 100 000, то аппарат надо располагать на первом этаже.* В нотации удобной для ввода в базу это правило выглядит следующим образом: *если свойство аппарата = "масса" и значение свойства > 100 000, то свойство помещения = "этаж" и значение свойства = "первый".*

Предположим, что ID_S=6 – для свойства "масса", ID_S=7 – для свойства "этаж". Программно нетрудно сформировать проверку элементарных ограничений:

Oxl(@ID_X) \equiv exists (select * from SX where SX.ID_X=@ID_X
and SX.ID_S=6 and SX.Z>10000),

Oxl(SX.ID_X) \equiv exists (select * from SX where SX.ID_X=X.ID_X
and SX.ID_S=6 and SX.Z>10000),

Ou1(@ID_U) \equiv exists (select * from SU where SU.ID_U=@ID_U
and SU.ID_S=7 and SU.Z="первый"),

Ou1(U.ID_U) \equiv exists (select * from SU where SU.ID_U=U.ID_U
and SU.ID_S=7 and SU.Z="первый").

Подставив полученные выражения в языковые конструкции (6.17) – (6.19), получаем синтаксис запросов, основанных на одном правиле – *если масса аппарата > 100 000, то аппарат надо располагать на первом этаже.*

6.5.2. Правила второго рода

Принадлежность вершины x_{j1} ребру u_{m1} , $x_{j1} \in X1_m$ определяется группой свойств вершины $\{s_{j1}\} \subset S$, $j1 \in J1 \subset J$, соединённых логическими условиями "И" и группой свойств ребра $\{s_{j2}\} \subset S$, $j2 \in J2 \subset J$, соединённых логическими условиями "И".

Пример правила: *если среда в аппарате взрывоопасна и токсична, то помещение должно быть оборудовано принудительной вентиляцией и иметь эвакуационный выход:*

$$\begin{aligned}
 & F1(z[s_{j_1}, x_{i_1}] \ominus_{r_1} z_{j_1, t_1}) \wedge x_{i_1} \in X_{1_{m_1}}, m_1 \in M, z_{j_1, t_1} \in Z_{j_1}, \\
 & j_1 \in J_1 \subset J, t_1 = \overline{1, T_{j_1}}, i_1 \in I, r_1 = \overline{1, R_1}, m_1 \in M \Rightarrow \\
 & F2(z[s_{j_2}, u_{m_1}] \ominus_{r_2} z_{j_2, t_2}), z_{j_2, t_2} \in Z_{j_2}, j_2 \in J_2 \subset J, \\
 & t_2 = \overline{1, T_{j_2}}, r_2 = \overline{1, R_2}
 \end{aligned}$$

Проверка истинности логических функций $F1()$ и $F2()$ в нотации SQL запишется конструкциями $OOx1(x)$ и $OOu1(u)$, выражения (6.9) и (6.11).

SQL-выражения для всех типов запросов первого уровня декомпозиции (тип 1 – 3) легко получить из (6.17) – (6.19) заменой конструкций $Ox1(X.ID_X)$, $Ox1(@ID_X)$, $Ou1(U.ID_U)$, $Ou1(@ID_U)$ на $OOx1(X.ID_X)$, $OOx1(@ID_X)$, $OOu1(U.ID_U)$, $OOu1(@ID_U)$.

6.5.3. Правила третьего рода

Принадлежность вершины x_{i_1} , ребру u_{m_1} , $x_{i_1} \in X_{1_{m_1}}$ определяется принадлежностью этому ребру другой вершины x_2 , $x_2 \in X_{1_{m_1}}$. Вершина x_{i_1} обладает свойствами $\{s_{j_1}\} \subset S$, $j_1 \in J_1 \subset J$, вершина x_2 – свойствами $\{s_{j_2}\} \subset S$, $j_2 \in J_2 \subset J$, для которых выполняются ограничения типа $F1()$, выражение (6.7).

Пример правила: *токарные станки следует располагать в одном помещении. По-другому это правило можно сформулировать так: если имеется станок, тип которого "токарный", и он расположен в помещении u_{m_1} , то другие станки с типом "токарный" следует располагать в помещении u_{m_1} . Функция $F1()$ в этом случае ограничивает свойство "тип станка" значением "токарный".*

$$\begin{aligned}
 & F1(z[s_{j_1}, x_{i_1}] \ominus_{r_1} z_{j_1, t_1}) \wedge F1(z[s_{j_2}, x_{i_2}] \ominus_{r_2} z_{j_2, t_2}) \wedge (x_{i_2} \in X_{m_1}), \\
 & z_{j_1, t_1} \in Z_j, j_1 \in J_1 \subset J, t_1 = \overline{1, T_{j_1}}, i_1 \in I, z_{j_2, t_2} \in Z_{j_2}, j_2 \in J_2 \subset J, \\
 & t_2 = \overline{1, T_{j_2}}, i_2 \in I, m_1 \in M \Rightarrow x_{i_1} \in X_{m_1}. \quad (6.20)
 \end{aligned}$$

Представим синтаксис всех запросов, основанных на правилах (6.20) в нотации SQL.

Тип 1. Ответ на вопрос можно ли размещать аппарат @ID_X в помещении @ID_U. Введём переменную @ret = 1, если аппарат в заданном помещении располагать можно, @ret = 0 в противном случае:

```

if OX1(@ID_X)
  if exists (select * from G,X
            where G.ID_X=X.ID_X and G.ID_U=@ID_U
            and OX1(X.ID_X))
    set @ret=1
  else set @ret=0.

```

Тип 2. Получить все помещения, в которых можно размещать аппарат @ID_X:

```

if OX1(@ID_X)
  select U.ID_U from U where exists (select G.ID_U from G, X
  where G.ID_X=X.ID_X and X.ID_X<>@ID_X and
  U.ID_U=G.ID_U and OX1(X.ID_X)).

```

Тип 3. Получить список аппаратов, которые необходимо ставить в помещении @ID_U:

```

select X1.ID_X from X X1 where OX1(X1.ID_X) and
exists (select G.ID_U from G, X where G.ID_U=@ID_U
and X.ID_X=G.ID_X and OX1(X.ID_X)).

```

6.6. ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА РЕБРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ ВЕРШИНЫ

Это правила, позволяющие по известным определённым свойствам вершины x_{i1} , принадлежащей ребру u_{m1} , найти определённые свойства этого ребра. Например: *если взрывоопасный аппарат находится в помещении, то помещение категории А.*

В практических задачах существуют следующие группы правил, определяющих свойства ребра в зависимости от свойств вершин:

1. Свойство s_{j2} ребра u_{m1} определяется одним свойством s_{j1} вершины x_{i1} этого ребра $x_{i1} \in X1_{m1}$:

$$z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta z_{j1, t1} \wedge x_{i1} \in X1_{m1}, m1 \in M, z_{j1, t1} \in Z_{j1}, j1 \in J1 \subset J,$$

$$i1 \in I, t1 \in \overline{1, T_{j1}} \Rightarrow z[s_{j2}, u_{m1}] = z_{j2, t2}, z_{j2, t2} \in Z_{j2},$$

$$j2 \in J2 \subset J, t2 \in \overline{1, T_{j2}}.$$

SQL-оператор изменения свойств рёбер запишется следующим образом. Заданы @ID_S1 – j1 свойство вершины, @z1 – z_{j1, t1} значение свойства вершины, @ID_S2 – j2 свойство ребра, @z2 – z_{j2, t2} – значение свойства ребра. Необходимо во всех рёбрах, которые имеют свойство @ID_S2, изменить значение этого свойства на @z2, если рёбра содержат вершины, для которых справедливо элементарное ограничение:

$$\begin{aligned} & \text{Ox1(X.ID_X)} \\ & \text{update SU set Z=@z2 where ID_S=@ID_S2 and ID_U in} \\ & \quad (\text{select G.ID_U from G, X where X.ID_X=G.ID_X} \\ & \quad \quad \text{and Ox1(X.ID_X)}). \end{aligned} \quad (6.21)$$

2. Свойство s_{j2} ребра u_{m1} определяется группой свойств $\{s_{j1}\} \subset S$, $j1 \in J1 \subset J$ вершины x_{i1} :

$$\begin{aligned} & F1(z[s_{j1}, x_{i1}]^{\Theta_{r1} z_{j1, t1}}) \wedge x_{i1} \in X1_{m1}, m1 \in M, z_{j1, t1} \in Z_j, \\ & \forall j1 \in J1 \subset J, i1 \in I, t1 \in \overline{1, T_j}, r1 = \overline{1, R1} \Rightarrow z[s_{j2}, u_{m1}] = z_{j2, t2}, \\ & z_{j2, t2} \in Z_j, j2 \in J, t2 \in \overline{1, T_j}, \end{aligned}$$

где $F1(z[s_{j1}, x_{i1}]^{\Theta_{r1} z_{j1, t1}}) = \bigcap_{r1=1}^{R1} (z[s_{j1}, x_{i1}]^{\Theta_{r1} z_{j1, t1}})$ – логическая функция, связывающая значения свойств вершины; $R1$ – количество связанных свойств.

В нотации SQL корректировка свойства ребра в этом случае получается из выражения (6.21) в котором Ox1(ID_X) заменяется на Oox1(ID_X), выражение (6.9).

3. Свойство s_{j2} ребра u_{m1} определяется группой свойств $\{s_{j1}\} \subset S$, $j1 \in J1 \subset J$ группы вершин $X1 = \{x_{i1}\}$, $i1 \in I1 \subset I$ этого ребра (т.е. свойства могут принадлежать разным вершинам ребра):

$$\begin{aligned} & \bigcap_{\forall i1 \in I1} F_{i1}(z[s_{j1}, x_{i1}]^{\Theta_{i1, r1} z_{j1, t1}}) \wedge \bigcap_{\forall i1 \in I1} x_{i1} \in X1_{m1}, m1 \in M, z_{j1, t} \in Z_{j1}, \\ & \forall j1 \in J1_{i1} \subset J, \forall i1 \in I1 \subset I, r1 = \overline{1, R1_{i1}}, t1 = \overline{1, T1_{i1}} \Rightarrow \\ & z[s_{j2}, u_{m1}] = z_{j2, t2}, z_{j2, t2} \in Z_{j2}, j2 \in J1_{m1} \subset J, t2 \in \overline{1, T2}. \end{aligned}$$

Корректировка значения свойства рёбер в нотации SQL в этом случае получается из выражения (6.21), в котором Ox1(ID_X) заменяется на Ooox, выражение (6.13).

6.7. ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА ВЕРШИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ РЕБРА

Эти правила позволяют по известным определённым свойствам ребра u_{m1} найти определённые свойства принадлежащих ему вершин $x_{i1} \in X_m$. В практических задачах существуют следующие группы правил определяющих свойства вершин в зависимости от свойств ребра.

1. Свойство s_{j1} вершин $x_{i1} \in X_m$ ребра u_{m1} определяется одним свойством ребра s_{j2} :

$$z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta z_{j2, t2}, m1 \in M, z_{j2, t2} \in Z_j, j2 \in J2 \subset J, t2 \in \overline{1, T2} \Rightarrow \\ z[s_{j1}, x_{i1}] = z_{j1, t1}, z_{j1, t1} \in Z_j, j1 \in J1 \subset J, t1 \in \overline{1, T1}, x_{i1} \in X1_{m1}.$$

SQL-оператор изменения свойств рёбер запишется следующим образом. Заданы @ID_S2 – $j2$ свойство ребра, @z2 – $z_{j2, t2}$ значение свойства ребра, @ID_S1 – $j1$ свойство вершины, @z1 – $z_{j1, t1}$ – значение свойства вершины. В случае истинности элементарного ограничения Ou1(U.ID_U) необходимо у всех вершин ребра, у которых есть свойство SX.ID_S=@ID_S1, изменить его значение SX.Z=@z1:

$$\text{update SX set Z=@z1 where ID_S=@ID_S1 and ID_X in} \\ (\text{select G.ID_X from U, G where U.ID_U=G.ID_U} \\ \text{and Ou1(U.ID_U)}). \quad (6.22)$$

2. Свойство s_{j1} вершин $x_{i1} \in X_m$ ребра u_{m1} определяется группой свойств $\{s_{j2}\} \subset S, j2 \in J2 \subset J$ этого ребра.

$$F2(z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_{r2} z_{j2, t2}), m1 \in M, z_{j2, t2} \in Z_j, j2 \in J2 \subset J, \\ t2 \in \overline{1, T2}, r2 = \overline{1, R2} \Rightarrow z[s_{j1}, x_{i1}] = z_{j1, t1}, z_{j1, t1} \in Z_j, \\ j1 \in J1 \subset J, t1 \in \overline{1, T1}, x_{i1} \in X1_{m1},$$

где $F2(z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_{r2} z_{j2, t2}) = \bigcap_{r2=1}^{R2} (z[s_{j2}, u_{m1}] \Theta_{r2} z_{j2, t2})$ – логическая функция, связывающая значения свойств ребра; $R2$ – число элементарных ограничений (число свойств ребра, определяющих свойства вершины).

SQL-оператор изменения свойств вершин получается заменой Ou1(U.ID_U) в (6.22) на OOu1(U.ID_U), выражение (6.11).

6.8. ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА ВЕРШИНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ ДРУГИХ ВЕРШИН

Правила, позволяющие найти значение свойства $j3$ одной вершины x_{i3} по известным свойствам $\{s_{j1}\} \subset S$, $j1 \in J1 \subset J$ другой вершины x_{i1} , причём вершины принадлежат одному ребру x_{i1} , $x_{i3} \in X1_{m1}$. В общем случае может быть, что $i1 = i3$, т.е. некоторое свойство вершины определяется через другие её свойства, тогда определяемое свойство $j3$ не должно принадлежать множеству определяющих свойств $J1$, $j3 \notin J1$.

Пример правила: *однотипные аппараты следует располагать в ряд. Это означает, что если аппараты располагаются в ряд по оси x и найдена (предложена) координата x одного аппарата, то и другие аппараты этого типа будут иметь такую же координату x :*

$$F1(z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1}) \wedge x_{i1} \in X1_{m1}, m1 \in M, z_{j1, t1} \in Z_j, j1 \in J1 \subset J, \\ i1 \in I, t1 \in \overline{1, T_j}, r1 = 1, R1 \Rightarrow z[s_{j3}, x_{i3}] = z_{j3, t3}, z_{j3, t3} \in Z_j, j3 \in J, \\ t3 \in \overline{1, T_{j3}}, i3 \in I, x_{i3} \in X1_{m1}, \text{ если } i3 = i1, j3 \notin J1,$$

где $F1(z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1}) = \bigcap_{r1=1}^{R1} (z[s_{j1}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j1, t1})$.

Для записи этого правила в нотации SQL введём обозначения. Известны @ID_X – определяющая вершина, набор свойств $J1$ и их значения для определяющей вершины, @ID_S3 – определяемое (изменяемое) свойство, @Z3 – новое значение определяемого свойства. Запишем правило для условия $i3 \neq i1$:

```
if OOx1(@ID_X)
  update SX set Z=@Z3 where ID_S=@ID_S3 and
  ID_X in (select G.ID_X from G where G.ID_X <> @ID_X
  and G.ID_U in (select G1.ID_U from G1 where
  G1.ID_X=@ID_X))
```

Условие $G.ID_X <> @ID_X$ соответствует условию $i3 \neq i1$.

6.9. ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ПРАВИЛ

Структура базы данных для хранения правил представлена на рис. 6.2. Правила записаны в нотации SQL и хранятся в таблицах PP, PR и PW в поле Текст_на_SQL в текстовом формате (nvarchar(max)). В поле Текст_на_EЯ хранится текст правила на естественном языке, который необходим для выдачи пояснения, почему принято то или иное решение.

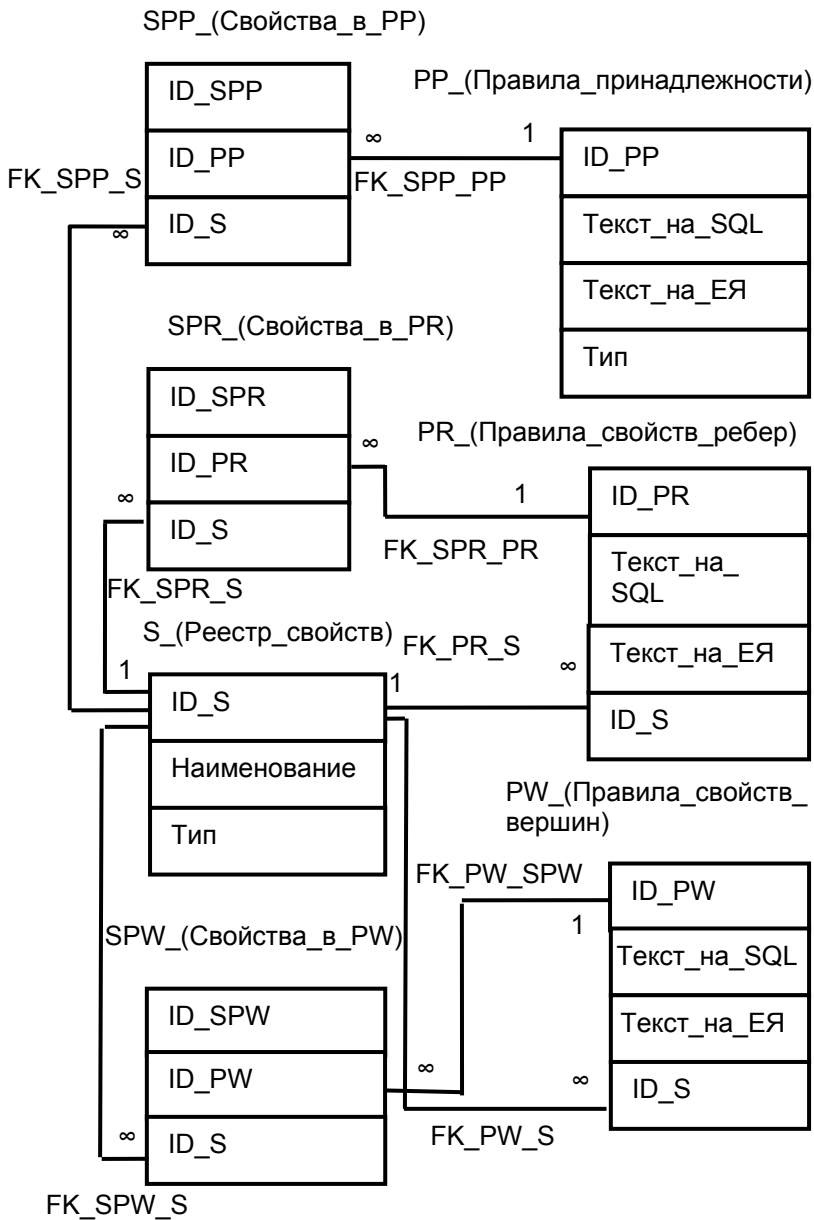


Рис. 6.2. Структура базы данных для хранения правил

Таблица PP содержит правила, определяющие принадлежность вершин ребру. Поле PP.Тип определяет характер запроса, на который отвечает правило (тип 1 – 5, раздел 6.3.). В таблицах PR и PW хранятся правила, которые позволяют найти свойства рёбер и вершин в зависимости от текущего состояния базы данных. Поле ID_S в таблицах PR и PW содержит первичный ключ искомого свойства.

Таблицы SPP, SPR и SPW содержат первичные ключи свойств ID_S, которые присутствуют в тексте правил. Эти таблицы нужны для обеспечения целостности базы, они не позволяют удалять свойство из таблицы S, если оно присутствует в тексте правила.

После поступления запроса любого типа сначала изменяются свойства вершин и рёбер в зависимости от текущей ситуации решения задачи размещения. Для этого в цикле обрабатываются последовательно все правила в таблицах PR и PW до тех пор, пока не будет выполнено ни одно правило. Затем осуществляется однократный проход по правилам таблицы PP. Если запрос первого типа, то результат 1 или 0 (можно или нельзя размещать вершину в ребре). Для остальных типов правил результаты работы каждого правила запоминаются во временной таблице, из которой затем удаляются дубликаты.

Процедура формирования ответа для запроса первого типа (можно ли размещать ребро в вершине):

```

create procedure PP_1 @ID_X1 int, @ID_U1 int, @ret1 int output
-- @ret1 = 1, если вершину @ID_X1 МОЖНО размещать
-- в ребре @ID_U1
-- @ret1 = 0, если вершину @ID_X1 НЕЛЬЗЯ размещать в ребре
-- @ID_U1
as
declare @PP nvarchar(max) -- текст правила
declare @param nvarchar(max) -- параметры правила
-- cursor_PP набор правил первого типа
declare cursor_PP cursor for select Текст_на_SQL from PP
where Тип=1
set @param=N'@ID_X int, @ID_U int, @ret int output'
set @ret1=1 -- предполагаем, что размещать вершину в
-- ребре можно
open cursor_PP
Fetch Next from cursor_PP into @PP -- чтение первого правила
-- функция @@fetch_status = 0, если чтение правила
-- прошло успешно
while @@fetch_status=0 and @ret1=1

```

```

begin
-- выполнение правила
execute sp_executesql @PP, @param, @ID_X=@ID_X1,
@ID_U=@ID_U1, @ret=@ret1 output
Fetch Next from cursor_PP into @PP -- чтение следующего правила
end
close cursor_PP
deallocate cursor_PP

```

Представленная процедура существенно упрощена по сравнению с реальной (промышленной). Так, например, в ней не приведён механизм формирования пояснения, почему вершину нельзя размещать в указанном ребре. Кроме того, процедура прекращает работать, как только найдено первое правило, запрещающее размещать вершину @ID_X в ребре @ID_U. Просмотр всех правил позволяет пользователю получить не одно, а все условия, которые запрещают размещение вершины @ID_X в ребре @ID_U, что необходимо для последующего анализа. В реальной процедуре пользователь сам выбирает режим работы, – выход по первому запрещающему условию или получение всех запрещающих условий.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Определение N-ориентированного гиперграфа.
2. Основные таблицы базы данных для хранения N-ориентированного гиперграфа.
3. Типы возможных запросов управляющей программы.
4. Виды элементарных ограничений.
5. Виды правил, ограничивающих принадлежность вершины ребру.
6. Виды правил определяющих свойства вершины.
7. Основные таблицы базы данных для хранения правил.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 6

1. *Автоматизированная* информационная система поддержки проектных решений по компоновке промышленных объектов. Ч. 1. Аналитические и процедурные модели [Текст] / С. Я. Егоров, В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, И. В. Милованов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 4. – С. 3 – 11.

2. *Автоматизированная* информационная система поддержки проектных решений по компоновке промышленных объектов. Ч. 2. Структура и функционирование системы [Текст] / С. Я. Егоров, В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, М. С. Громов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 1. – С. 33 – 39.

3. *Применение* N-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем [Текст] / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. С. Мордвин, А. А. Илясов // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 115 – 122.

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ ХТС

Описывается подход к решению задачи оптимальной трассировки технологических трубопроводов основанный на использовании параллельных вычислений.

Математическая модель задачи трассировки включает ограничения [1].

Условие 1. Прокладка проводников осуществляется в ортогональной метрике:

$$\begin{cases} (x_{jn+1} - x_{jn})(y_{jn+1} - y_{jn}) = 0; \\ (x_{jn+1} - x_{jn})(z_{jn+1} - z_{jn}) = 0; \\ (y_{jn+1} - y_{jn})(z_{jn+1} - z_{jn}) = 0, \forall n \in \{0, 1, \dots, k_{j-1}\}, j \in M^1. \end{cases} \quad (7.1)$$

Условие 2. Трассировка печатных плат должна быть осуществлена в разрешённых для прокладки трасс зонах. Обозначим через ρ номер уровня. Тогда для прокладки проводников, параллельных оси OY , выделяется уровень $[U_{\rho^*}^y, U_{\rho}^{y*}]$, а для проводников, параллельных OX , – $[U_{\rho^*}^x, U_{\rho}^{x*}]$. Для любой точки излома $(x_{jn}, y_{jn}, z_{jn}), n = 1, 2, \dots, K_{j-1}$ j -й трассы, $j \in M^{19}$ существует такой уровень ρ , что

$$z_{jn} \in [U_{\rho^*}^x, U_{\rho}^{x*}] \cup [U_{\rho^*}^y, U_{\rho}^{y*}], \quad (7.2)$$

т.е. любая точка излома трассы находится в одном из уровней, выделенных для прокладки проводников.

Условие 3. Не пересечение трасс друг с другом:

$$\rho(c', c'') \geq \frac{d_{j'} + d_{j''}}{2} + l_{j'} + l_{j''} + l_r, \forall j', j'' \in M^{12}. \quad (7.3)$$

Условие 4. Не пересечение трасс с объектами:

$$\left(|x_i - x_{c'}| \geq \frac{a_i + d_j}{2} + S_i + l_j + l_a \right) \vee \left(|y_i - y_{c'}| \geq \frac{b_i + d_j}{2} + S_i + l_j + l_a \right). \quad (7.4)$$

Критерий оптимальности задачи трассировки печатных плат имеет следующий вид [2]:

$$TRAS^* = \arg \min \{I(TRAS) | TRAS \in H = m(D)\}, \quad (7.5)$$

где D – множество вариантов трассировки технологических коммуникаций; H – множество допустимых вариантов проектных решений;

$$I = \sum_{j=1}^L (S_{1j}\varphi_j + S_{2j}K_j) - \text{критерий}; \quad TRAS = \{TRAS_j | TRAS_j = \{(X_{jn}, Y_{jn}, Z_{jn}),$$

$n = \overline{0}, K_j, j = \overline{1, L}$ – вариант трассировки.

Исходя из всего изложенного, можно сформулировать задачу трассировки технологических соединений следующим образом: определить координаты $(X_{jn}, Y_{jn}, Z_{jn})_{n=0, 1, \dots, k_j}$ трасс ($j = 1, L$, так, чтобы выполнялись условия (7.1) – (7.4) и критерий (7.5) достигал минимума.

Не во всех алгоритмах трассировки возможно эффективное применение параллельных вычислений. Результаты анализа особенностей алгоритмов трассировки и их переносимости на параллельные платформы приведены в табл. 7.1.

С учётом табл. 7.1, а также предложенной математической модели, для решения поставленной задачи выбирается волновой алгоритм трассировки.

В работе предложен последовательный волновой алгоритм, адаптированный под задачу трассировки ХТС.

7.1. Результаты анализа алгоритмов трассировки ХТС

Класс алгоритма	Свойства	Возможность распараллеливания
Волновые	1. Гарантируют построение трассы, если путь для неё в принципе существует. 2. Высокая точность решений. 3. Низкое быстродействие	Да
Канальные	1. Высокое быстродействие. 2. Получаемые решения не всегда оптимальны	Да
Ортогональные	1. Высокое быстродействие. 2. Не всегда находят путь	Частично, в связи с зависимостью лучей друг от друга
Эвристические	1. Имеют высокое быстродействие. 2. Не гарантируют построение трассы	Частично, в связи со сложностью взаимодействия эвристических правил

Разобьём условно работу алгоритма на три этапа:

- 1) анализ области трассировки (шаги 1 – 6);
- 2) распространение волны (шаги 7 – 12);
- 3) выбор оптимального пути (шаги 8 – 17).

Опишем последовательный волновой алгоритм, в виде следующей последовательности шагов:

1. Выбирается трасса с номером из матрицы $C(Lc \times 3)$.

2. Пространство трассировки разбивается на множество элементарных ячеек, где dx , dy , dz – количество ячеек, расположенных в длину, ширину и высоту соответственно. Размер ячеек выбирается кратным наибольшему диаметру трубопровода, что позволяет обеспечить прокладку наибольшего количества трасс.

3. Формируется матрица $K(m, n, a)$, где $m = dx$, $n = dy$, $a = dz$ соответственно.

4. Каждому элементу $k(m, n, a)$ матрицы $K(m, n, a)$ присваивается некоторое значение в зависимости от свойств элемента dm, n, k :

– если ячейка di, j, k содержит в себе какой-либо объект, за исключением штуцера-источника и штуцера-приёмника этой трассы, или содержит зоны, запретные для трассировки, то $K(m, n, a) = (dx \times dy \times dz) + 2$;

– если ячейка di, j, k не содержит в себе объектов, т.е. является проходимым для трассы, то $K(m, n, a) = (dx \times dy \times dz) + 1$;

– если ячейка di, j, k содержит в себе зоны, временно запретные для трассировки, то $K(m, n, a) = (dx \times dy \times dz) + 3$. Данные ячейки вначале рассматриваются как запретные для трассировки, если же какая-либо из трасс не может быть построена, то эти области начинают рассматриваться как проходимые.

5. $t_{вр} = 0$, где $t_{вр}$ – счётчик итераций; $t_{max} = M \times N \times A + 1$ – константа, которая лимитирует число итераций.

6. $m = 1, n = 1, a = 1$.

Фрагмент работы этапа *анализ области трассировки* представлен на рис. 7.1.

7. Если $k(m, n, a) = t_{вр}$, то просматриваются соседние элементы $k(m + 1, n, a)$, $k(m - 1, n, a)$, $k(m, n + 1, a)$, $k(m, n - 1, a)$, $k(m, n, a + 1)$, $k(m, n, a - 1)$ по следующим правилам:

– если $k(m + 1, n, a) = M \times N \times A$ то $k(m, n, a) = k(m + 1, n, a)$ переходим на пункт 13;

– если $k(m + 1, n, a) = (dx \times dy \times dz) + 1$, то $k(m + 1, n, a) = t_{вр} + 1$;

– иначе $k(m + 1, n, a)$ не изменяется.

Аналогично просматриваются элементы $k(m - 1, n, a)$, $k(m, n + 1, a)$, $k(m, n - 1, a)$, $k(m, n, a + 1)$, $k(m, n, a - 1)$.

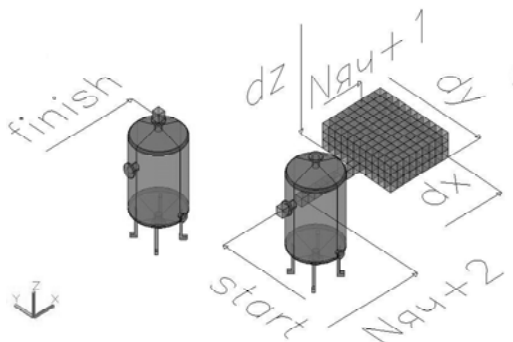


Рис. 7.1. Фрагмент работы этапа анализ области трассировки

8. Если $n < N$, то $n = n + 1$ и осуществляется переход на пункт 7.
9. Если $m < M$, то $m = m + 1$ и осуществляется переход на пункт 7.
10. Если $a < A$, то $a = a + 1$ и осуществляется переход на пункт 7.
11. $t_{вр} = t_{вр} + 1$. Если $t_{вр} > t_{\max}$, то поиск маршрута признаётся неудачным и переходим на пункт 16, иначе переходим на пункт 6.
12. Из группы элементов массива: $k(m + 1, n, a)$, $k(m - 1, n, a)$, $k(m, n + 1, a)$, $k(m, n - 1, a)$, $k(m, n, a + 1)$, $k(m, n, a - 1)$ выбирается элемент с наименьшим значением, при этом $m_{вр} = m$, $n_{вр} = n$, $a_{вр} = a$.
13. Осуществляется построение канала трассы через ячейки $dm.n.a - dm_{вр}.n_{вр}.a_{вр}$.
14. Если $k(m_{вр}, n_{вр}, a_{вр}) = 0$, то переходим на пункт 15, иначе $m = m_{вр}$, $n = n_{вр}$, $a = a_{вр}$ и осуществляется переход на пункт 12.
15. Осуществляется прокладка трассы по созданному каналу,
16. Переход на пункт 1.
17. Конец.

Фрагмент этапа *выбор оптимального пути* изображён на рис. 7.2.

Укрупнённая блок-схема последовательного волнового алгоритма трассировки ХТС предложена на рис. 7.3.

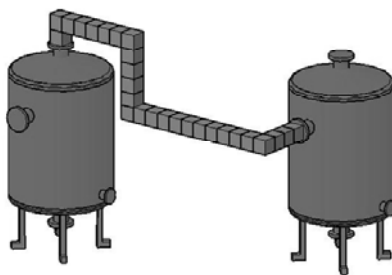


Рис. 7.2. Этап выбор оптимального пути

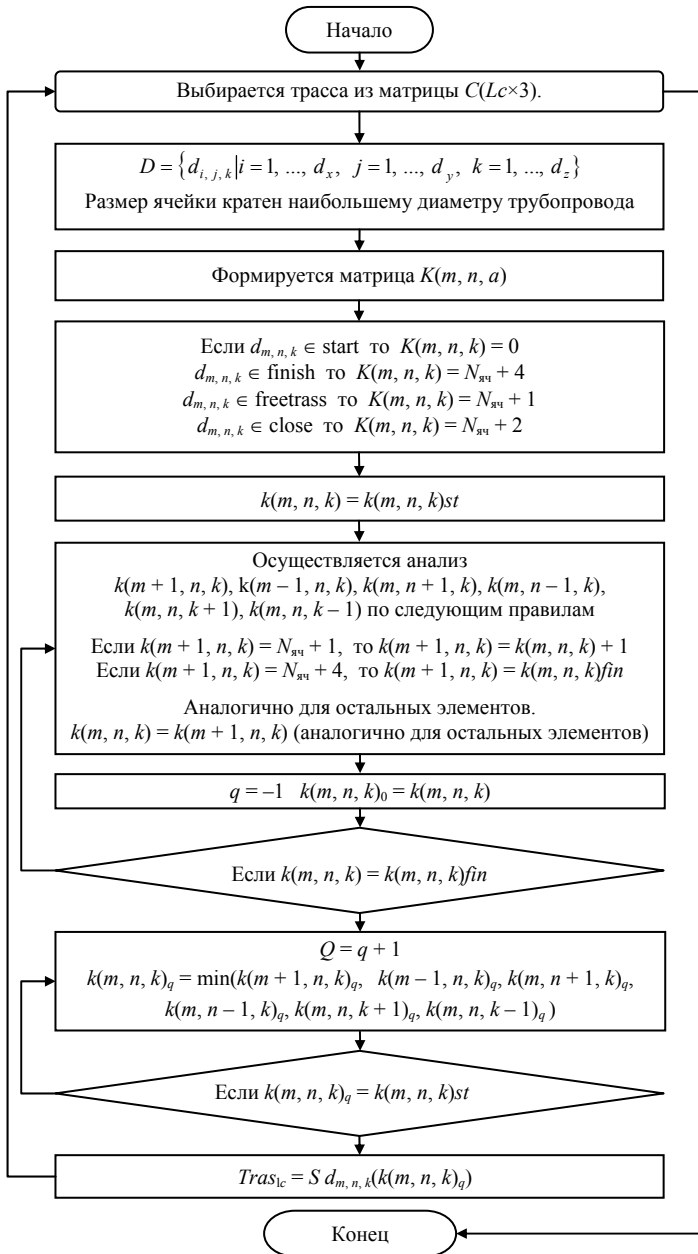


Рис. 7.3. Укрупнённая блок-схема волнового алгоритма трассировки ХТС

7.2. Анализ этапов волнового алгоритма на возможность применения параллельных вычислений

№ этапа	Название этапа	Возможность применения параллельных вычислений
1	Анализ области трассировки	Возможно
2	Параллельная трассировка нескольких проводников	Возможно
3	Распространение волны	Возможно
4	Выбор оптимального пути	Затруднительно, из-за необходимости полного перебора всех данных, необходимых для выбора пути

Рассмотрим каждый из этапов данного алгоритма на возможность применения в них параллельных вычислений (табл. 7.2) более подробно.

Анализ области трассировки включает в себя пункты 2 – 4 рассматриваемого алгоритма. Матрица $K(m, n, a)$ делится на равное подмножество строк методом ленточного разбиения [3] (рис. 7.4). Количество строк матрицы, обрабатываемое одним процессором:

$$Nct = m a / Npr,$$

где Npr – число имеющихся процессоров. Каждый процессор получает на обработку подмножество строк, определённое следующими выражениями:

$$Nct - 1 = (q - 1) \times Nct, \quad Nct + 1 = q \times Nct,$$

где $q = 1, \dots, Npr$ – номер процессора, для которого осуществляется выборка; $Nct - 1, Nct + 1$ – минимальный и максимальный номер строк подмножества.

Далее каждый процессор производит над своими данными действия, описанные в пункте 4. После завершения работы всех процессоров на данном этапе, они передают данные в матрицу $K(m, n, a)$.

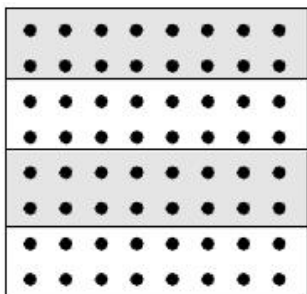


Рис. 7.4. Ленточное разбиение матрицы
(точками обозначены элементы матрицы, лентой – множество элементов, обрабатываемое одним процессором)

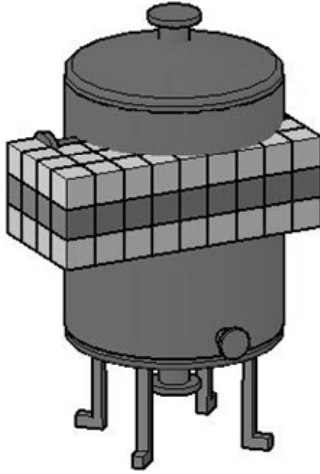


Рис. 7.5. Фрагмент работы алгоритма на этапе анализ области трассировки, разными цветами обозначены данные, обрабатываемые разными процессорами

Фрагмент этапа *анализа области трассировки* изображён на рис. 7.5.

Этап *распространения волны* включает в себя пункты 5 – 11 рассматриваемого алгоритма. Для распараллеливания этого этапа воспользуемся парадигмой параллельного программирования мастер-исполнитель (master-worker) [4]. Выделяется так называемый мастер-процессор X_0 , который будет управлять равномерным распределением данных по остальным процессорам X_n , называемым рабочими. Начиная от точки начала распространения волны St , мастер-процессор передаёт каждому рабочему процессору на обработку одну из ячеек, значение элемента матрицы которой соответствует рассматриваемому в данный момент фронту волны. После того как рабочий процессор выполнит работу над своими данными, он посылает сигнал мастер-процессору, в котором передаёт полученные результаты, а также сообщение, что он освободился; в свою очередь мастер-процессор передаёт данному подчинённому процессору на обработку следующую ячейку, значение элемента матрицы которой соответствует или рассматриваемому или следующему фронту волны. Эти действия продолжают до тех пор, пока какой-либо фронт не дойдёт до конечной точки трассы.

Каждый рабочий процессор проделывает следующие операции над переданными ему на обработку данными: если определяется, что переданная ячейка свободна для трассировки, то элементу матрицы,

соответствующему этой ячейке, присваивается значение, равное номеру текущего фронта волны: $k(m, n, a) = N_{\text{волн}}$. Далее рабочий процессор просматривает шесть соседствующих с рассматриваемой ячейкой областей (каждая граничит с какой-либо гранью рассматриваемой ячейки). Если среди этих ячеек есть свободные для трассировки, то рабочий процессор присваивает элементам матрицы, соответствующим этим ячейкам, номер следующего фронта волны. Таким образом, каждый рабочий процессор формирует определённую часть следующего фронта волны, данные о котором передаются на мастер-процессор и тот в свою очередь передаёт определённые части этого фронта на обработку свободным рабочим процессорам. Фрагмент этапа *распространения волны* изображён на рис. 7.6.

Для проверки возможностей волнового алгоритма с параллельными вычислениями используем процессор с общей памятью фирмы intel core i7/930i, имеющий четыре ядра. Возьмём цех с габаритными размерами 16 000×17 000×10 500 метров. Расставим в нём пять аппаратов.

Представим исходные данные аппаратов в виде табл. 7.3, исходные данные по трассам – в виде табл. 7.4, конечные результаты выполнения трассировки – в виде табл. 7.5.

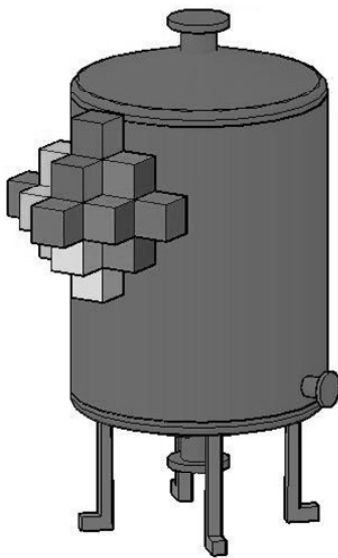


Рис. 7.6. Фрагмент этапа распространения волны

7.3. Исходные данные аппаратов

$N_{\text{апп}}$	Координаты центров аппаратов			Габаритные размеры аппаратов			Угол привязки аппаратов
	X_c	Y_c	Z_c	A_c	B_c	D_c	a_c
1	4159	10 636	3479	3479	4050	3500	0
2	3887	5168	246	1520	3500	1050	0
3	8227	2136	3479	3479	4050	3500	0
4	8227	2136	3479	3479	4050	3500	0
5	14 194	7873	3479	3479	4050	3500	0

7.4. Исходные данные для трасс

$N_{\text{апп}}$	$N_{\text{тр}}$	Координаты начала трассы			Координаты конца трассы		
		X_{JO}	Y_{JO}	Z_{JO}	X_{JK_j}	Y_{JK_j}	Z_{JK_j}
$N1 - N3$	Tr1	4159	10 636	6688	5909	2136	5022
$N1 - N2$	Tr2	1926	10 636	4731	11 876	7873	3501
$N1 - N2$	Tr3	4159	8318	1872	4764	5272	224
$N2 - N3$	Tr4	4572	5520	744	8227	2136	927
$N3 - N5$	Tr5	10 309	2136	2180	12 569	15 219	5039
$N3 - N5$	Tr6	8227	2136	7098	14 887	15 219	7098

7.5. Конечные результаты выполнения трассировки

$N_{\text{апп}}$	$N_{\text{тр}}$	Координаты начала трассы			Координаты конца трассы			Координаты точек изломов		
		X_{JO}	Y_{JO}	Z_{JO}	X_{JK_j}	Y_{JK_j}	Z_{JK_j}	X_{JM}	Y_{JM}	Z_{JM}
$N1 - N3$	Tr1	4159	10 636	6688	5909	2136	5022	4159	10 636	7779
								4159	7601	7779
								4159	7601	5022
								4159	2136	5022
$N1 - N2$	Tr2	1926	10 636	4731	11 876	7873	3501	104 741	106 361	4731
								047	7873	3501
$N1 - N2$	Tr3	4159	8318	1872	4764	5272	224	4159	6217	1872
								5534	6217	1872
								5534	5272	1872
								553	5272	224

$N_{\text{анп}}$	$N_{\text{тр}}$	Координаты начала трассы			Координаты конца трассы			Координаты точек изломов		
		X_{JO}	Y_{JO}	Z_{JO}	X_{JK_j}	Y_{JK_j}	Z_{JK_j}	X_{JM}	Y_{JM}	Z_{JM}
N2 – N3	Tr4	4572	5520	744	8227	2136	927	4572	5520	1391
								4572	2136	1391
								4564	2136	329
								8227	2136	329
N3 – N5	Tr5	10 309	2136	2180	12 569	15 219	5039	11 121	2136	2180
								11 121	2136	5039
								11 121	15 219	5039
N3 – N5	Tr6	8227	2136	7098	14 887	15 219	7098	14 887	15 219	7098
								14 887	15 219	7098
								14 887	15 219	7849

Результаты работы алгоритма по решению задачи, поставленной перед ним в 3D формате, представлены на рис. 7.7.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 7.6. Испытания проводились с использованием 1, 2, 3 и 4 процессоров.

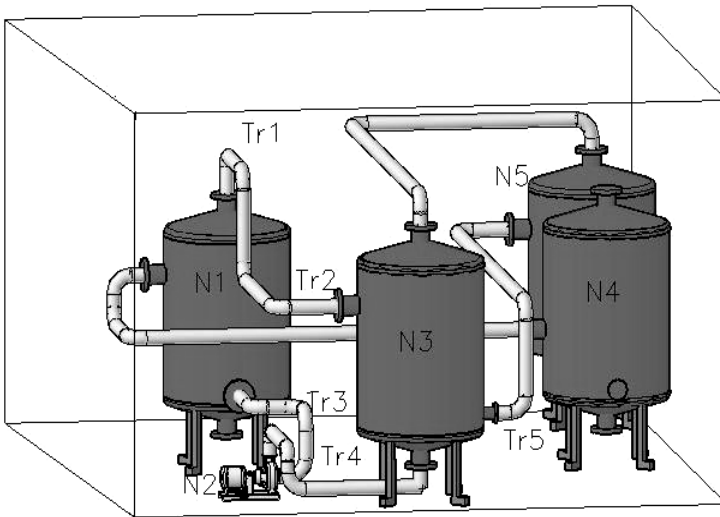


Рис. 7.7. Конечный результат трассировки трубопроводов ХТС

7.6. Результаты вычислительного эксперимента

Количество ячеек	Последний алгоритм	Параллельный алгоритм					
		2 процессора		3 процессора		4 процессора	
		Время	Ускорение	Время	Ускорение	Время	Ускорение
$N_{\text{яч}}$	Время, с						
1000	120,44	64,0700	1,8798	53,88814	2,235	49,99792	2,4089
2000	240,12	127,4319	1,8843	87,89165	2,732	71,91805	3,3388
3000	360,56	215,3883	1,6740	146,86760	2,455	113,46210	3,1778
4000	480,23	295,2899	1,6263	195,53340	2,456	146,24220	3,2838
5000	600,44	313,4475	1,9156	220,91240	2,718	171,58860	3,4993

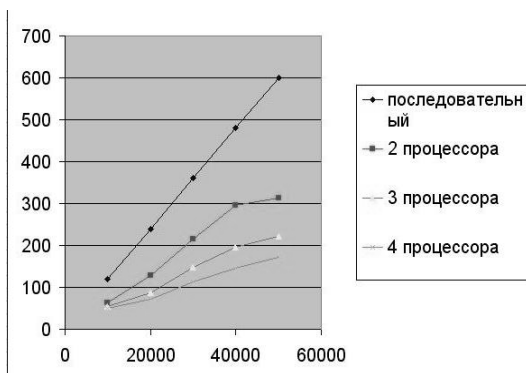


Рис. 7.8. График зависимости времени выполнения алгоритма от количества разбивочных ячеек

График зависимости времени выполнения алгоритма от количества разбивочных ячеек изображён на рис. 7.8.

Таким образом, благодаря использованию параллельных вычислений получаем существенное ускорение работы алгоритма, и при этом сохраняется оптимальность получаемых при помощи данного алгоритма решений.

На основе представленного волнового алгоритма с параллельными вычислениями разработана информационная система трассировки, работающая в системе Autocad, которая используется в Тамбовском государственном техническом университете в учебном процессе при выполнении лабораторных работ, курсовых и дипломных проектов.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.В37.21.0234 Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы".

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие задачи, связанные с компоновкой оборудования, чаще всего решаются на производстве?
2. Какие критерии используются при автоматизированном решении задач трассировки?
3. Назовите основные алгоритмы, используемые при прокладке трасс технологических трубопроводов.
4. В каких зонах осуществляется прокладка трасс трубопроводов по этажам и на этажах цеха?
5. Какова роль человека при автоматизированном решении задач трассировки трубопроводов?
6. В чём суть распараллеливания вычислений при разработке алгоритмов трассировки?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 7

1. *Информационно-логическая модель трассировки технологических трубопроводов* / С. Я. Егоров, К. А. Шаронин, И. С. Фурсов, К. В. Немтинов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 826 – 830.
2. *Автоматизированная информационная система поддержки проектных решений по компоновке промышленных объектов. Ч. 1. Аналитические и процедурные модели (Ч. 2 см. № 1, 2010 г.)* / С. Я. Егоров, В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, И. В. Милованов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 4. – С. 3 – 11.
3. *Гергель, В. П.* Теория и практика параллельных вычислений. Этапы разработки параллельных алгоритмов [Электронный ресурс] / В. П. Гергель. – URL : <http://www.intuit.ru/department/calculate/paralltp/4/2.html>.
4. *Борисенко, А. Б.* Применение параллельных вычислений для расчёта аппаратурного оформления химико-технологических систем / А. Б. Борисенко, Д. В. Кутузов, А. В. Осовский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т 17, № 2. – С. 493–494.

ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В РЕЖИМЕ УДАЛЁННОГО ДОСТУПА

Традиционные способы, описывающие химико-технологические объекты, отображают их в виде технологических регламентов и схем, чертежей оборудования и отдельных его элементов, что не даёт полного представления об их функционировании. Наиболее полное их исследование возможно только на основе многостороннего подхода с применением различных информационных технологий, затрагивающих не только зрительное содержание. Решить такую задачу можно средствами комплексного использования различных программных сред: систем имитационного моделирования, геоинформационных систем (ГИС), интернет-технологий и др.

8.1. ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время многие промышленные производства представляют собой сложные динамические системы, характеризующиеся высоким уровнем неопределённости исходной информации и сложностью их поведения. Для решения многих проблем, связанных с управлением таких систем, а также для облегчения работы операторов и технологов химико-технологических систем можно использовать имитационное моделирование.

Для исследования технологических процессов рассматриваемого в работе класса промышленных производств целесообразно использовать системы, позволяющие имитировать реальные процессы [1, 2].

Компьютерная имитационная модель является удобным для системного анализа вспомогательным средством для исследования химико-технологических объектов. Главным преимуществом имитационного моделирования является то, что эксперт может ответить на вопрос: "*что будет, если ...*", т.е. с помощью эксперимента на модели выработать стратегию исследования.

В основе создания имитационных моделей лежат информационно-логические модели (ИЛМ), описывающие условия протекания технологических процессов. В общем виде ИЛМ поддержки принятия решений при исследовании химико-технологического объекта пред-

ставляет собой объединение множеств данных и связей между ними, записанных в виде правил. Отдельное продукционное правило модели (ПМ), содержащееся в базе знаний, состоит из двух частей: антецедента и консеквента. Антецедент представляет собой посылку правила (условную часть) и состоит из элементарных предложений, соединённых логическими связками "и, или". Консеквент (заключение) включает одно или несколько предложений, которые выражают либо некоторый факт, либо указание на определённое действие, подлежащее исполнению [3].

Таким образом, ИЛМ может быть представлена следующим кортежем:

$$M = \langle D, P \rangle, D = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_N), P = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_s), \quad (8.1)$$

где M – оператор ИЛМ; $d_1, \dots, d_i, \dots, d_N$ – множество данных ИЛМ; $p_1, \dots, p_j, \dots, p_s$ – множество правил.

В свою очередь, правила, входящие в модель, построены по типу: *если ... (условия выполняются), то ... (реализация следствия)*, в формализованном виде описываются следующим образом:

$$p^k : \{if((d_1^{k'} A_1 z_1^{k'}) \wedge (d_2^{k'} A_2 z_2^{k'}) \wedge \dots \wedge (d_{n-1}^{k'} A_{n-1} z_{n-1}^{k'})) then(d_{1m}^{k''} A'_{1m} z_{1m}^{k''})\}, \quad (8.2)$$

где *if* – обозначение условия "если"; *then* – обозначение следствия "то"; $A_1, \dots, A_i, A'_i \in \{=, <, \leq, \geq, >\}$, $i = \overline{1, n}$ – арифметический оператор; $\wedge_i \in \{\wedge, \vee\}$ – логический оператор; $d_n^{k'}, d_{1m}^{k''}$ – соответственно входные и выходные данные модели; $Z^{k'} = z_1^{k'}, \dots, z_n^{k'}$ – множество значений входных данных $d_n^{k'}$; $z^{k''} \in \{z_{11}^{k''}, \dots, z_{1m}^{k''}\}$; – значение для выходных данных $d_{1m}^{k''}$; n – количество условий, k – индекс правила ПМ.

Конкретный вид ИЛМ для исследования химико-технологического объекта рассмотрим на примере определения стадии производства продукта в зависимости от характеристик исходного сырья: "характеристики исходного сырья и промышленных продуктов" – "стадии производства продукта", а также на примере определения типа оборудования: "стадии производства продукта" – "оборудование". Для этого используем множества данных о характеристиках исходного сырья и промышленных продуктов $S_{\text{воды}}$, данных о стадиях производства продукта $St_{\text{прод}}$ и данных об оборудовании $Ob_{\text{прод}}$ (табл. 8.1–8.2):

$$S_{\text{прод}} = \{s_{\text{прод}, 1}, \dots, s_{\text{прод}, i}, \dots, s_{\text{прод}, I}\}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (8.3)$$

$$St_{\text{прод}} = \{st_{\text{прод}, 1}, \dots, st_{\text{прод}, i}, \dots, st_{\text{прод}, I}\}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (8.4)$$

$$Ob_{\text{прод}} = \{ob_{\text{прод}, 1}, \dots, ob_{\text{прод}, i}, \dots, ob_{\text{прод}, I}\}, \quad i = \overline{1, I}. \quad (8.5)$$

Характеристики исходного сырья и промышленных продуктов

- $S_{\text{прод}, 1}$ = "слабощелочная реакция среды";
- $S_{\text{прод}, 2}$ = "массовая концентрация бета-нафтола 243...245 г/дм³";
- $S_{\text{прод}, 3}$ = "массовая концентрация едкого натра 67...69 г/дм³";
- $S_{\text{прод}, 4}$ = "массовая концентрация разбавленного раствора серной кислоты 170...200 г/дм³";
- $S_{\text{прод}, 5}$ = "массовая доля раствора нитрита натрия 25...40%";
- $S_{\text{прод}, 6}$ = "массовая концентрация разбавленного раствора серной кислоты 170...200 г/дм³";
- $S_{\text{прод}, 7}$ = "приём охлаждённого до 0 °С разбавленного раствора серной кислоты";
- $S_{\text{прод}, 8}$ = "масса избытка серной кислоты 30...33 кг 100%-ной массы серной кислоты";
- $S_{\text{прод}, 9}$ = "показателя активности водородных ионов 6,5...7 ед. рН";
- $S_{\text{прод}, 10}$ = "массовая доля бисульфита натрия 22,5%";
- $S_{\text{прод}, 11}$ = "массовая доля раствора 80...100 г/дм³";
- $S_{\text{прод}, 12}$ = "показатель активности водородных ионов 4,4...4,7 ед. рН";
- $S_{\text{прод}, 13}$ = "реакция среды полученной суспензии пигмента ясно-щелочная на бриллиантовую жёлтую бумагу (9,0...9,5 ед. рН)";
- $S_{\text{прод}, 14}$ = "цвет комплексного соединения – голубой";
- ...

Стадии производства продукта

- $St_{\text{прод}, 1}$ = "растворение";
- $St_{\text{прод}, 2}$ = "нитрозирование";
- $St_{\text{прод}, 3}$ = "сочетание";
- ...

Оборудование

$Ob_{\text{прод}, 1}$ = "реактор для приготовления натриевой соли бета-нафтола"

$Ob_{\text{прод}, 2}$ = "реактор для нитрования бета-нафтола";

$Ob_{\text{прод}, 3}$ = "аппарат для сочетания";

...

8.1. Примеры правил по определению стадии производства в зависимости от характеристики исходного сырья и промышленных продуктов

Условие	Следствие
$S_{\text{прод}, 1} \& S_{\text{прод}, 2} \& S_{\text{прод}, 3} \& S_{\text{прод}, 4} \& S_{\text{прод}, 5}$	$St_{\text{прод}, 1}$
$S_{\text{прод}, 6} \& S_{\text{прод}, 7} \& S_{\text{прод}, 8} \& S_{\text{прод}, 9} \& S_{\text{прод}, 10} \& S_{\text{прод}, 11}$	$St_{\text{прод}, 2}$
$S_{\text{прод}, 12} \& S_{\text{прод}, 13} \& S_{\text{прод}, 14}$	$St_{\text{прод}, 3}$
...	...

В качестве примера приведём содержание правила 1.

Правило 1: если $S_{\text{прод}, 1}$ = "слабощелочная реакция среды" и $S_{\text{прод}, 2}$ = "массовая концентрация бета-нафтола 243...245 г/дм³" и $S_{\text{прод}, 3}$ = "массовая концентрация едкого натра 67...69 г/дм³" и $S_{\text{прод}, 4}$ = "массовая концентрация разбавленного раствора серной кислоты 170...200 г/дм³" и $S_{\text{прод}, 5}$ = "массовая доля раствора нитрита натрия 25...40%", то стадия производства продукта $St_{\text{прод}, 1}$ = "растворение".

8.5. Примеры правил по определению оборудования в зависимости от стадии производства продукта

Условие	Следствие
$St_{\text{прод}, 1}$	$Ob_{\text{прод}, 1}$
$St_{\text{прод}, 2}$	$Ob_{\text{прод}, 2}$
$St_{\text{прод}, 3}$	$Ob_{\text{прод}, 3}$
...	...

В качестве примера приведём содержание правил 1, 2.

Правило 1: если $St_{\text{прод}, 1}$ = "растворение", то оборудование $Ob_{\text{прод}, 1}$ = "реактор для приготовления натриевой соли бета-нафтола".

Правило 2: если $St_{\text{прод}, 2}$ = "нитрозирование", то оборудование $Ob_{\text{прод}, 2}$ = "реактор для нитрования бета-нафтола".

Реализованная ИЛМ в среде системы моделирования динамических процессов, например в SIMUL8, будет являться инструментом для исследования химико-технологического объекта.

8.2. КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Геоинформационные системы в настоящее время широко применяются в мире во многих областях знаний. Это связано с тем, что ГИС становятся универсальной средой для интеграции самых различных информационных технологий и построения многофункциональных информационно-аналитических систем [4]. В данном случае ГИС служат главной цели – построению виртуального зрительного образа, который, в свою очередь, дополняется автоматизированной информационно-аналитической системой, что приводит к построению единого информационного пространства территории промышленного предприятия и его пространственно-временной модели. При этом пользователь сам выбирает объект (цех), который ему предстоит исследовать. Многочисленная и разноплановая информация об объекте может быть в любой момент востребована им из информационно-аналитической базы данных [5, 6]. Такой вариант может быть успешно реализован и в сети Интернет, что может быть полезно при изучении технологических схем производства (например, производства органических красителей) как студентам соответствующих специальностей, так и операторам по их обслуживанию.

При создании виртуальных моделей в качестве базовой информационной системы используется ГИС, имеющая средства трёхмерного моделирования, позволяющая построить пространственную модель предприятия, включающую все цеха по производству его основной продукции (органических красителей, добавок к полимерным материалам и т.п.) [3, 7 – 9]. При этом пользователь может самостоятельно выбрать любой цех и ознакомиться с технологией производства продукта, нарабатываемого в нём.

Одним из способов решения проблемы отображения пространственной модели территориально-распределённых объектов является разработанная авторами технология создания пространственных моделей химико-технологических объектов, на основе которой возможно построение системы отображения и обмена данными, в том числе и по сети Интернет (см. рис. 8.1). Следует отметить, что при её реализации используется свободно-распространяемое программное обеспечение (табл. 8.6).

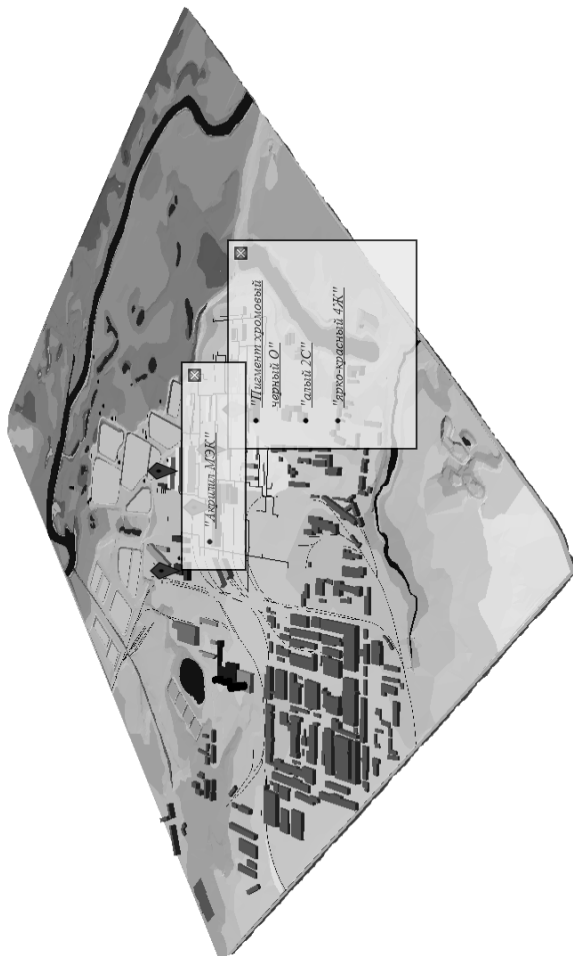


Рис. 8.1. 3D-вид пространственной модели территории предприятия

8.6. Базовое программное обеспечение

Название и версия продукта	Условия распространения	Официальный сайт
Openlayers 2.8 – скрипт визуализации WMS и WFS слоёв на единой web-карте, обеспечивающий удобное масштабирование	Freeware	http://openlayers.org
PHP – скриптовый язык		http://www.php.net
SIMUL8- моделирование процесса химико-технологической системы	Лицензионное соглашение	http://www.simul8.com

Сильной стороной данного подхода является использование трёх информационных областей для отображения данных (рис. 8.2). Экран пользователя делится на три информационных поля, в каждом из которых отображается свой тип информации:

- 1) двумерные (трёхмерные) модели плана предприятия с поддержкой функции использования тематических слоёв;
- 2) имитационная модель технологического процесса исследуемого производства;
- 3) текстовая справка с регламентом производства.

Рассмотрим каждое информационное поле в отдельности. В качестве программного средства, используемого для отображения географических карт, используется библиотека JavaScript – OpenLayers. За последнее время эта библиотека расширилась большим количеством функций, что позволило использовать её для большинства несложных задач вместо требовательных к ресурсам развитых географических систем. Неоспоримым плюсом OpenLayers является её выполнение на стороне клиента, что не несёт нагрузку на сервер. Благодаря этому программному продукту, разработчик может использовать данные с различных серверов. Например: можно использовать в качестве нижнего слоя готовые карты таких картографических сервисов, как GoogleMaps, Яндекс.Карты или других сервисов, предоставляющих данные по технологии WMS (Web Map Service), а в качестве верхних слоёв – собственные карты, маркеры, произвольные растровые и векторные элементы и др.

Рассмотрим подробнее технологию создания растрового слоя. Для начала необходимо создать привязку растрового слоя. Выбираем систему координат WGS 84 и расставляем опорные точки. Затем создаются векторные слои, используемые для различных сценариев исследования объектов промышленного предприятия.

Таким образом, используя данный подход к формированию картографического материала, возможно разместить в одном информационном поле максимальное количество информации для представления пространственных данных.

Второе информационное поле используется для отображения имитационной модели функционирования химико-технологической схемы производства, разработанной в среде SIMUL8.

В данной работе предложена технология создания имитационных моделей на примере технологических процессов многоассортиментных химических производств, используя возможности применения системы SIMUL8, для оперативного управления выпуском целевой продукции. Основными стадиями технологии являются: формирование библиотеки данных технологических режимов, создание графических образов элементов технологических схем процессов, разработка имитационной модели в среде SIMUL8.

Общий вид модели представляет собой технологическую схему производства. Ёмкостные аппараты, насосы, фильтр-прессы в модели представлены в виде "рабочих центров". Мерники, загрузочные бункеры, дозаторы представлены в виде "рабочей вводной точки". Марны, в которые выгружают готовый продукт, представлены в виде "рабочей выходной точки". В соответствии с регламентом всё оборудование соединено связями. Основными данными для построения модели являются: календарный график выпуска продуктов, нормы технологического режима процесса производства конкретного продукта. Причём каждая характеристика процесса может быть задана фиксированным числом, либо являться случайной величиной из некоторого диапазона в соответствии с выбранным законом распределения.

Реализуя предложенную технологию разработки имитационных моделей технологических процессов химических производств с использованием системы моделирования дискретных процессов SIMUL8, создана библиотека моделей производств полупродуктов и красителей, в частности: пигмента алого 2С, пигмента ярко-красного 4Ж, пигмента хромового черного О, лака ПФ-060, 3-оксихинальдин-4-карбоновой кислоты, 3-оксихинофталола, акририла МЭК и т.д.

В тех случаях, когда у конечного пользователя не установлена система SIMUL8, ему предоставляется возможность просмотра видеороликов с демонстрацией функционирования соответствующей модели.

Последнее, третье, информационное поле используется для формирования текстовой информации. Учитывая, что система базируется на web-сервере, в данном поле посредством языка PHP (скриптовый

язык программирования общего назначения, интенсивно применяемый для разработки web-приложений), осуществляется поддержка баз данных. При этом возможно осуществлять поиск необходимой атрибутивной информации об объекте, производить сравнение и т.д. В него встраивается html страница, позволяющая предоставить пользователю текст вместе с графикой.

Компоновка всех трёх информационных областей осуществляется с помощью фреймов, поддерживаемых любым интернет-браузером. Применение фреймов, позволяет пользователю вручную менять размеры информационных областей, увеличивая ту область, которая ему в данный момент интересна.

В конечном итоге мы получаем web-сервис, совмещающий в себе различные технологии, позволяющий получить максимальное количество информации об объекте и её удобное представление. Базовое программное обеспечение данной технологии бесплатно и нетребовательно к ресурсам. Несомненным плюсом является возможность просмотра web-сервиса в интернет-браузере, не устанавливая дополнительных клиентских программных продуктов, за исключением системы SIMUL8.

Разработанная технология комплексного использования различных программных сред при моделировании химико-технологических объектов реализована в виде учебной подсистемы и используется в ФГБОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет" при подготовке студентов по специальности 151701 "Проектирование технологических машин и комплексов", входящей в перечень специальностей, соответствующих приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики [<http://www.170514.tstu.ru/ios/>].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие современные информационные технологии используются при исследовании химико-технологических объектов?
2. Назовите области применения имитационных моделей.
3. Какие классы динамических систем можно моделировать с помощью системы SIMUL8?
4. Каково значение геоинформационных систем при исследовании химико-технологических объектов?
5. Что означают антецедент и консеквент при описании информационно-логических моделей?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 8

1. *Немтинова, Ю. В.* Имитационное моделирование технологических процессов химических производств / Ю. В. Немтинова, А. А. Пчелинцева, А. А. Бубнов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – № 17. – С. 449 – 452.
2. *Немтинов, В. А.* Использование системы моделирования динамических процессов для оперативного управления промышленным производством / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова, Д. С. Русских // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 7. – С. 43 – 48.
3. *Пахомов, П. И.* Геоинформационная модель территории при поддержке принятия решений по управлению объектами коммунальных систем / П. И. Пахомов, В. А. Немтинов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – № 15. – С. 199 – 207.
4. *Немтинов, В. А.* Перспективы использования ГИС-технологий в химической промышленности / В. А. Немтинов // Химическая промышленность. – 2004. – № 4. – С. 8 – 12.
5. *Немтинов, В. А.* Создание Информационных справочных систем с использованием технологии INTERNET / В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, В. Г. Мокрозуб // Информационные технологии. – 1999. – № 7. – С. 37 – 39.
6. *Опыт* разработки электронной графической справочной системы по технологическому оборудованию и её использование в учебном процессе / С. Я. Егоров, В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, И. В. Милованов // Информационные технологии. – 1999. – № 8. – С. 35 – 37.
7. *Технология* создания пространственных моделей территориально распределённых объектов с использованием геоинформационных систем / В. А. Немтинов, А. М. Манаенков, В. В. Морозов, К. В. Немтинов // Информационные технологии. – 2008. – № 8. – С. 23 – 25.
8. *Информационное пространство* при управлении химическим предприятием / В. А. Немтинов, А. М. Манаенков, В. В. Морозов, К. В. Немтинов // Химическая промышленность сегодня. – 2010. – № 7. – С. 6 – 13.
9. *Использование* Интернета при информационной поддержке принятия решений по управлению промышленным предприятием / В. А. Немтинов, А. М. Манаенков, В. В. Морозов, Е. С. Егоров // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 8 – 12.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

В настоящее время движение транспорта во многих городах Российской Федерации представляет собой сложную динамическую систему, характеризующуюся высоким уровнем неопределённости исходной информации и сложностью её поведения. Для решения многих проблем, связанных с управлением таких систем можно использовать компьютерное моделирование, реализующее методологию системного анализа, центральной процедурой которого является построение обобщённой модели, отражающей все факторы реальной системы. При этом в качестве методологии исследования выступает вычислительный эксперимент.

Компьютерное моделирование значительно расширяет возможности и эффективность работы лиц принимающих решения (ЛПР), предоставляя им удобный инструмент и средства для достижения поставленных целей. Оно реализует итерационный характер разработки модели системы, поэтапный характер детализации моделируемых подсистем, что позволяет постепенно увеличивать полноту оценки принимаемых решений по мере выявления новых проблем и получения новой информации.

Современные тенденции в области имитационного моделирования связаны с развитием проблемно-ориентированных систем, созданием встроенных средств для интеграции моделей в единый модельный комплекс; технологический уровень современных систем моделирования характеризуется большим выбором базовых концепций формализации и структуризации моделируемых систем, развитыми графическими интерфейсами и анимационным выводом результатов [1, 2].

Транспортная система является одной из основных составных частей инфраструктуры города, которая обеспечивает жизненно важные потребности населения. Функционирование всех отраслей городского хозяйства невозможно без рациональной и налаженной работы городской транспортной системы (ГТС). Поэтому рационализация её развития и планирования является одной из актуальных проблем теории и практики планирования. К группе планирования относятся задачи принятия централизованных решений об использовании ресурсов ГТС. В эту группу входят задачи планирования развития транспортной системы, маршрутизации, составления расписаний и т.д. [3, 4].

Рост концентрации и увеличение доли городского населения – это объективная тенденция развития общества. Быстрые темпы роста городского населения и увеличение его подвижности порождают целый ряд проблем, связанных с развитием транспорта в городах. Роль и масштабность работы ГТС в условиях непрерывного роста городов, концентрации в них населения и насыщенности транспортными средствами требуют проведения широкого круга научных исследований и практических работ, направленных на совершенствование сети городского пассажирского транспорта (ГПТ).

Целью данной работы является разработка математической модели функционирования сети ГПТ и механизма, позволяющего автоматизировать процесс создания имитационной модели на её основе для проведения дальнейших компьютерных экспериментов. Для решения поставленной задачи необходимо решить следующий комплекс задач, связанных с: формальным описанием структуры сети ГПТ и параметров её функционирования; разработкой математической модели функционирования сети ГПТ, структуры базы данных для хранения информации, алгоритма построения имитационной модели.

В настоящее время известно множество визуальных средств моделирования, среди которых универсальным средством имитационного моделирования для рассматриваемого класса задач является система SIMUL8 [5].

9.1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Наиболее распространённый и наглядный подход к описанию транспортной сети – это представление её в виде графа. Вершины графа представляют собой остановочные пункты (остановки) – специально оборудованные места для посадки и высадки пассажиров. Рёбра графа отождествляются с перегонами между остановочными пунктами. Их основными характеристиками являются расстояние и максимальная разрешённая скорость движения. Транспортные средства в сети движутся по заранее определённым маршрутам. Маршрут – это перечень остановочных пунктов, которые в предопределённом порядке объезжает транспортное средство. Каждый маршрут характеризуется узловыми точками. Это остановочные пункты, на которых фиксируется соответствие текущего времени и времени подъезда транспортного средства по расписанию движения к данной остановке.

Представление транспортной сети в виде графа закладывает в информационную систему возможность использования большого количе-

ства уже существующих алгоритмов для программной оптимизации транспортных перевозок по результатам выполнения модели.

Режим работы маршрутной транспортной сети подчиняется, в первую очередь, расписанию движения подвижного состава. В нём содержится информация о количестве подвижного состава на каждом маршруте, количестве рейсов каждого транспортного средства и о времени прохождения контрольных точек маршрута. Таким образом, под оптимизацией работы ГПТ в первую очередь подразумевается определение оптимального расписания движения транспорта, а также характеристик маршрутных транспортных средств, к которым относятся: скорость перемещения, вместимость, стоимость обслуживания, стоимость проезда и др. [6 – 7].

Составление расписания является обычной задачей линейного программирования, однако на практике это далеко не так. В расписание движения вносит свои коррективы окружающая обстановка на дорогах – пробки, аварии, светофоры. В связи с этим, расписание, составленное обычными методами, целесообразно проверять на имитационной модели (которая учитывает вышеупомянутые нюансы) и по результатам её выполнения можно вносить коррективы в режим работы транспортной сети.

Так как сеть ГПТ является сложной динамической системой и характеризуется большим количеством стохастической информации, то и сама математическая модель основана на различного рода вероятностях.

Исходная информация для математической модели функционирования транспортной сети: $n_{ik}^l(t)$ – количество пассажиров, севших на i -й маршрут на k -й остановке в момент времени t ; $n_{ik}^m(t)$ – количество пассажиров, вышедших на k -й остановке с i -го маршрута; L_j^i – расстояние между i -м и j -м остановочным пунктом; N_i – количество транспортных средств на i -м маршруте.

$R_{ic} = \{t_{ik1}, t_{ik2}, \dots, t_{ikn}\}$ – расписание движения ГПТ, где i – номер маршрута; c – номер транспортного средства на маршруте; n – число узловых точек маршрута; kn – номер узловой точки маршрута; t – время прибытия транспортного средства.

Весь период времени моделирования работы транспортной сети разбивается на конечное число интервалов $T = \{t_1, t_2, \dots, t_s\}$, где T – период времени функционирования транспортной сети; s – количество интервалов, на которое разбит весь период времени.

Вероятность, с которой с i -й остановки в k -й маршрут в момент времени t сядет пассажир, равна

$$p_{ij}^l = \frac{\sum_t n_{ik}^l(t)}{\sum_t \sum_{r=1}^n n_{rk}^l(t)}. \quad (9.1)$$

Вероятность, с которой на i -й остановке с k -го маршрута выйдет пассажир, равна

$$p_{ij}^m = \frac{\sum_t n_{ik}^m(t)}{\sum_t \sum_{r=1}^n n_{rk}^m(t)}. \quad (9.2)$$

Интервал появления пассажиров на i -й остановке, который поедет на k -м маршруте, определяется

$$\Delta t^l(t_s) = \frac{t_s}{\sum_t \sum_{r=1}^n n_{rk}^l(t_s)}. \quad (9.3)$$

Интервал времени, с которым пассажиры выходят на i -й остановке с k -го маршрута, равен

$$\Delta t^m(t_s) = \frac{t_s}{\sum_t \sum_{r=1}^n n_{rk}^m(t_s)}. \quad (9.4)$$

Скорость движения транспорта между остановочными пунктами

$$V = \frac{t_{k_{i-1}} - t_{k_i}}{L_{t_{k_{i-1}}}^{t_{k_i}}}. \quad (9.5)$$

Время прибытия транспортного средства на b -й остановочный пункт

$$T_b^{prib} = t_{k_i} + VL_b^{k_i} + \alpha_1(t), \quad (9.6)$$

где t_{k_i} – время подъезда к ближайшей предшествующей контрольной точке; $L_b^{k_i}$ – расстояние от ближайшей узловой точки до текущей остановки; $\alpha_1(t)$ – случайная величина, отражающая неточность выполнения расписания, возникающая под влиянием пробок и аварийных ситуаций на дорогах, а также работы светофоров.

Количество пассажиров в c -м автобусе k -го рейса на i -й остановке

$$Q_{ic}^k = Q_{ic}^{k-1}(t) + N_{ic}^{\text{вошел}} - N_{ic}^{\text{вышел}}, \quad (9.7)$$

где

$$N_{ic}^{\text{вошел}} = \frac{t_s}{\Delta t^l(t_s)} p_{ic}^l, \quad N_{ic}^{\text{вышел}} = \frac{t_s}{\Delta t^m(t_s)} p_{ic}^m. \quad (9.8)$$

Большинство исходных данных, используемых в модели (9.1) – (9.8) получены в результате проведения натурных исследований в течение продолжительного промежутка времени пассажиропотоков на примере г. Тамбова.

9.2. РЕАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ ЕЁ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ В СРЕДЕ SIMUL8

Для реализации имитационной модели выбрана система имитационного моделирования динамических процессов SIMUL8 [8]. Данная система обладает мощным набором инструментов для проведения моделирования и дальнейшей обработки результатов. В основе разработки имитационной модели в среде SIMUL8 лежит объектно-ориентированный подход. Каждому реальному объекту или процессу ставится в соответствие объект (либо их сочетание) моделирования SIMUL8.

При создании имитационной модели ГПТ можно выделить следующие соответствия:

- останочный пункт – имитируется объектом Work Center;
- транспортное средство – Work Item;
- процесс появления пассажиров на остановке – Work Entry Point;
- очередь пассажиров на остановке, а также очередь транспортных средств перед ней – моделируются при помощи объектов типа storage bin;
- маршруты и расписание движения хранит в себе объект Job Matrix.

Для хранения информации о текущем количестве пассажиров, общем количестве перевезённых людей и так далее используются объекты label, которые присоединяются к объектам типа Work Item.

Для хранения всей необходимой информации о транспортной сети разработана структура базы данных в СУБД MS Access (рис. 9.1).

Для удобства наполнения базы данных информацией, а также автоматизированного построения модели в среде SIMUL8 по информации из БД на языке Visual Basic разработана программа, рабочее окно которой представлено на рис. 9.2.

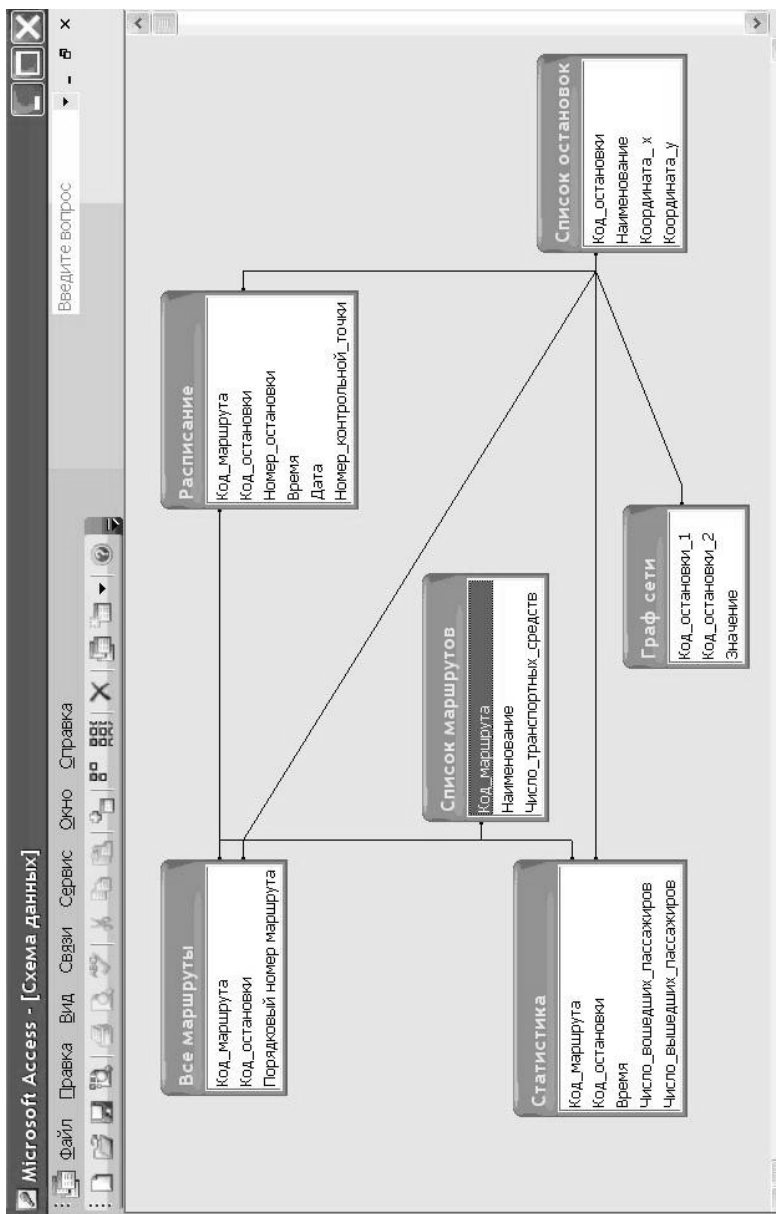


Рис. 9.1. Схема базы данных для хранения информации о сети ГПТ

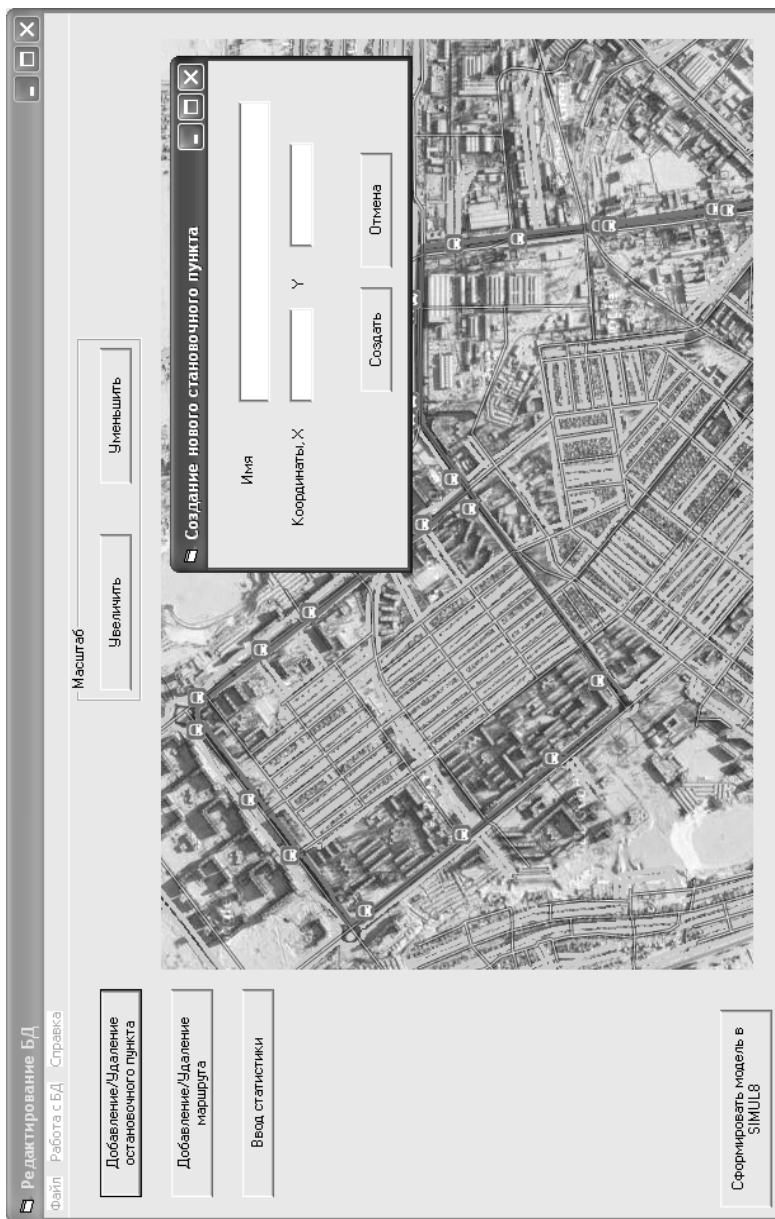


Рис. 9.2. Рабочее окно программы

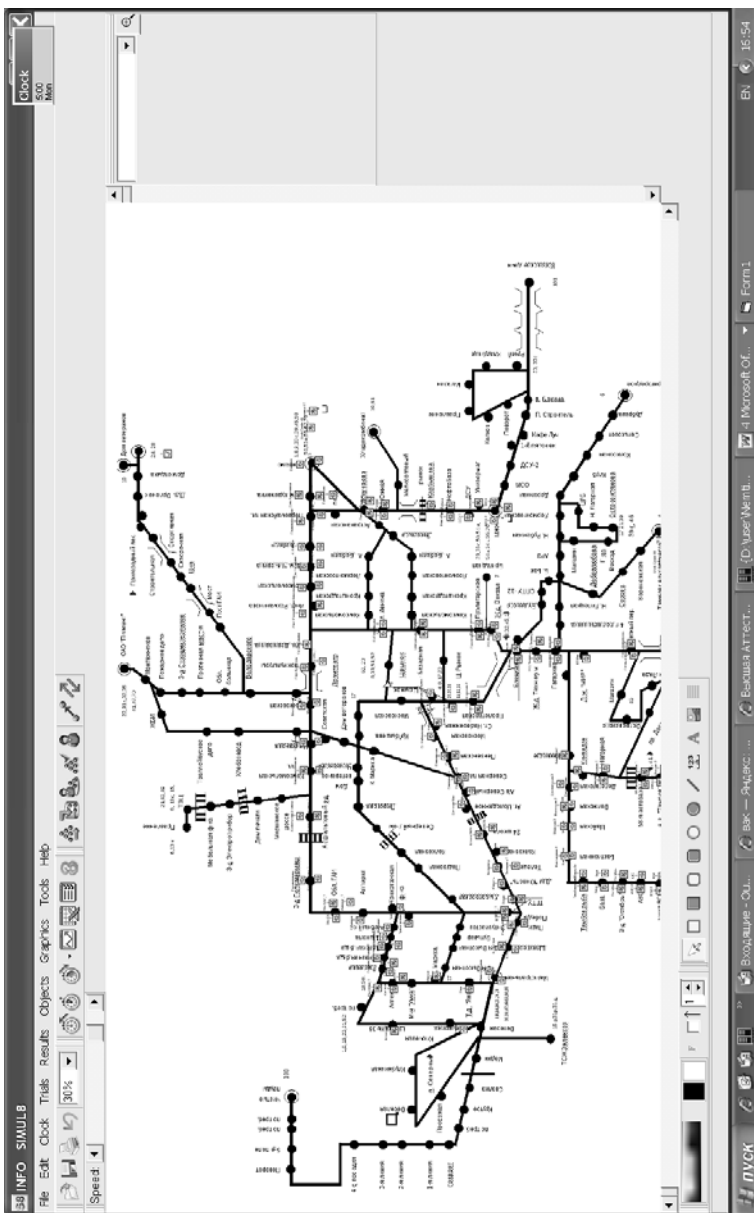


Рис. 9.3. Визуализация общего вида модели сети ППТ г. Тамбова

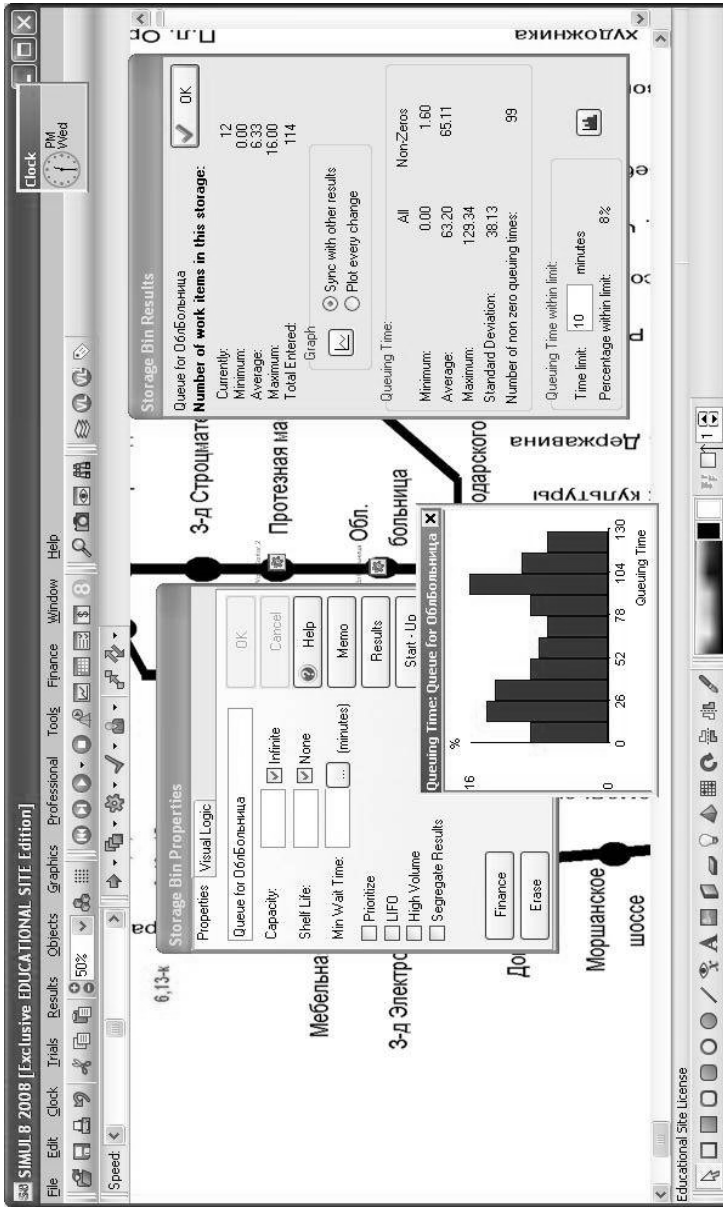


Рис. 9.4. Пример результатов моделирования отдельного остановочного пункта

Результатом работы данной программы является готовая имитационная модель сети ГПТ в среде SIMUL8 (рис. 9.3). Иллюстрация, на которой показаны результаты моделирования отдельного остановочного пункта, в том числе и диаграмма зависимости числа человек на остановке от времени, представлена на рис. 9.4.

Разработанная авторами математическая модель функционирования маршрутной транспортной сети и информационная система, реализованная в среде SIMUL8, позволяет автоматизировать процесс построения имитационной модели и обработку результатов моделирования. Полученная модель является мощным инструментом анализа, оптимизации и развития маршрутной транспортной сети. С её помощью можно моделировать различные ситуации и заранее продумывать пути решения проблем, возникающих в системе ГПТ.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите области применения имитационных моделей.
2. Назовите особенности функционирования транспортных систем.
3. Какие информационные системы используются для имитационного моделирования непрерывных и дискретных процессов?
4. Каким образом в системе SIMUL8 можно оценить эффективность работы отдельного объекта и всей системы в целом?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 9

1. *Хемди, А.* Имитационное моделирование. Введение в исследование операций [Текст] / А. Хемди, Н. Таха. – М. : Вильямс, 2007. – 737 с.
2. *Строгалева, В. П.* Имитационное моделирование [Текст] / В. П. Строгалева, И. О. Толкачева. – М. : МГТУ им. Баумана, 2008. – С. 697 – 737.
3. *Сафронов, Э. А.* Транспортные системы городов и регионов : учебное пособие [Текст] / Э. А. Сафронов. – М. : Изд-во АСВ, 2005. – 272 с.
4. *Сафронов, К. Э.* Начало реформирования ГПТ – совершенствование маршрутных сетей городов [Текст] / К. Э. Сафронов, Д. С. Киммель // Автомобильный транспорт. – 2004. – № 5. – С. 57–58.
5. *Немтинов, В. А.* Оперативное управление транспортными потоками в населённых пунктах с использованием системы моделирова-

ния динамических процессов [Текст] / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова, Ю. А. Донских // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 3. – С. 12 – 14.

6. *Немтинов, В. А.* Имитационная модель транспортных потоков г. Тамбова / В. А. Немтинов, Ю. А. Донских // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2010610706 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентом и товарным знаком. Дата рег. 20 января 2010 г.

7. *Немтинов, В. А.* Имитационное моделирование транспортных систем [Текст] / В. А. Немтинов, Ю. А. Донских, К. В. Немтинов // XIII науч. конф. ТГТУ. "Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование" сборник трудов – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО "ТГТУ", 2010. – С. 33 – 35.

8. *SIMUL8.* Animate Your Business. Simulation Software. – SIMUL8 Corporation. – 2002. – 362 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРАКТИВНОГО 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЁРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Важнейшим фактором повышения надёжности функционирования промышленных технических систем является снижение влияния человеческого фактора на возникновение отказов технологического оборудования и развитие аварийных ситуаций. Данная проблема становится особенно актуальной в последние десятилетия в связи с активным внедрением в промышленность инновационных наукоёмких технологий, которые существенно повышают сложность управления технической системой. Количество аварийных ситуаций в химической и нефтегазовой промышленности, машиностроении, энергообъектах и других промышленных предприятиях, возникающих по вине человеческого фактора, увеличивается год от года.

Применение средств автоматизации, информационных систем поддержки принятия решений, автоматических средств предотвращения возникновения аварийных ситуаций направлено на автоматизацию процесса управления и сокращение количества обслуживающего персонала, что, в свою очередь, повышает требования к квалификации персонала.

Разработка полномасштабных тренажёров не может быть реализована для большинства промышленных производств вследствие их большого размера и высокой стоимости. Современный уровень развития компьютерных технологий открывает широкие возможности для разработки электронных средств обучения и тренинга персонала технических систем. Решение данной задачи предлагается осуществлять с использованием виртуальных тренажёрных комплексов [1 – 4], которые направлены на всестороннюю подготовку оператора к решению различных производственных задач как в штатном, так и аварийном режимах функционирования.

При разработке программного обеспечения пультов управления технических систем, входящих в состав виртуального тренажёрного комплекса, использовалась среда программирования LabVIEW, позволяющая не только успешно имитировать реальный пульт управления

системой, но и обеспечивать возможность совместного тренинга группы операторов в сетевом режиме под контролем инструктора.

Помимо имитации пульта управления технической системой в виртуальном тренажёрном комплексе следует предусматривать модуль 3D-моделирования рабочего пространства оператора (размещение технологического оборудования и системы управления, помещения цеха, производственная площадка и др.).

При моделировании виртуального производственного помещения возникает задача классификации, создания и размещения множества объектов в сцене с помощью геометрических преобразований в соответствии с предъявляемыми требованиями к создаваемой модели.

Рассмотрим объекты виртуального производственного пространства в виде совокупности множеств:

$$VirtPr = Ter \cup BSP \cup Vol \cup StM \cup SkM \cup PS \cup AS \cup TXR \cup Mat \cup SC \cup Lh ,$$

где $VirtPr$ – моделируемое виртуальное производственное пространство; Ter – множество объектов ландшафта; BSP – множество объектов BSP-геометрии (Binary Space Partitioning); Vol – множество объёмов (Volume); StM – множество статических моделей объектов (Static Meshes), которые импортируются в рабочую среду из сторонних редакторов; SkM – множество скелетных моделей (Skeletal Meshes); PS – множество систем частиц (Particle Systems); AS – множество анимации (Animation Sets); TXR – множество текстур; Mat – множество материалов; SC – множество звуковых сигналов (Sound Cues); Lh – множество источников света (Lights).

Рассмотрим подробнее каждое из перечисленных множеств.

Множество Ter . Ландшафт в реальном мире представляет собой участок поверхности земли, в пределах которого все природные компоненты находятся во взаимосвязанном единстве. В случае виртуального производственного пространства моделируем участок поверхности, образованный множеством слоёв Lr (для создания общей картины представления ландшафта) и множества декораций Dec (для создания реалистичного природного ландшафта производственной площадки):

$$Ter = Lr \cup Dec .$$

В качестве декораций могут выступать модели травы, листья, деревья. В состав UDK входит пакет создания деревьев, SpeedTree, который в ряде случаев помогает снизить нагрузку на ресурсы компьютера, в сравнении с использованием стандартных средств визуализации [5].

Примеры использования отдельных объектов, входящих в состав интерактивной модели производственной площадки, проиллюстрированы на рис. 10.1.

Множество BSP. Множество объектов BSP-геометрии, которые включают "заполненные" и "пустые" части пространства. Они описываются с помощью набора замкнутых трёхмерных объектов, составленных из не пересекающихся поверхностей, которые создаются с помощью инструмента brush (*кисть*). Этот принцип построения пространства называется конструктивной сплошной геометрией (CGS – Constructive Geometry Solid). Элементы множества *BSP* делятся на:

- сплошные (solid) – полноценно участвуют в двоичном разбиении пространства;
- аддитивные (additive) – "заполняют" двоичное пространство;
- вычитаемые (subtractive) – "вырезают" объёмы в пространстве;
- полусплошные (semi-solid) – не влияют напрямую на двоичное дерево пространства, однако влияют на её физическую модель и служат для создания "невидимых" препятствий;
- пустые (non-solid) – только создают поверхности, не влияют на двоичное дерево пространства.

Множество Vol. Volumes – объёмы, невидимые участки виртуального пространства, которым могут соответствовать различные параметры, и которые могут нести разный смысловой характер. Различают несколько типов volume:

- BlockingVolume – область в пространстве, в которой отсутствует возможность перемещения;
- TriggerVolume – область, в которой предусмотрена возможность выполнения действий по сценарию (например, при взаимодействии человека с данным объёмом будет происходить определённое, заранее описанное действие);
- WaterVolume – область, соответствующая физическим свойствам воды (является компонентом при создании жидкостной среды в ёмкостных аппаратах, водоёмов производственной площадки и т.п.).

Пример показан на рис. 10.1.



Рис. 10.1. Фрагмент модели производственной площадки

Множество *StM*. Статические модели объектов, построенные на основе множества взаимосвязанных полигонов. Объекты *StM* в интерактивном режиме могут быть перемещены в пространстве в реальном времени. На основе данной технологии можно создавать объекты более сложных форм и точной детализации, чем в случае использования CGS [6].

Элементы множества *StM* содержат информацию о форме объекта (вершины, рёбра и грани), ссылки на текстуры (фактические текстуры хранятся в отдельных пакетах) и описание модели столкновения. Существуют три типа столкновений *StM* :

- без столкновения – *StM* не блокирует никакие объекты и действия (используются для оформления виртуального пространства незначительными объектами, как, например, трава);
- полигональное столкновение (используется по умолчанию) – каждый отдельный полигон *StM* может либо иметь столкновение с другими объектами, либо не иметь, причём независимо от остальных (типичный пример: ствол дерева сталкивается, но его листья нет);
- простые столкновения – *StM* не вступают в столкновение сами, но имеют встроенные *Vol* блокирования, которые сталкиваются вместо него (обычно, *Vol* будут иметь более простую форму, чем *StM* , в результате чего снижается ресурсопотребление).

Хотя *StM* имеют встроенную информацию о том, какие текстуры они используют, это может быть перекрыто путём добавления новых свойств поверхности в реальном времени [6]. Примеры элементов множества *StM* представлены на рис. 10.1.

Множество *SkM*. Множество скелетных моделей аналогично множеству *StM* . Отличие заключается только в том, что элемент данного множества может быть анимирован. Предварительно указывается расположение скелета (bones), в результате чего осуществляется автоматическая деформация внешней поверхности (skin) объекта (рис. 10.2). Такой подход позволяет комбинировать различные сочетания анимации объекта.

Множество *PS*. Термин система частиц относится к понятиям компьютерной графики, где используется для описания определённых нечётких явлений, визуализация которых затруднена с помощью обычных методов. В состав UDK входит удобный редактор систем частиц UnrealCascade (рис. 10.3), позволяющий создать такие элементы, как огонь, взрывы, дым, движение воды, искры, падающие листья, облака, туман, снег, пыль, волосы и др.

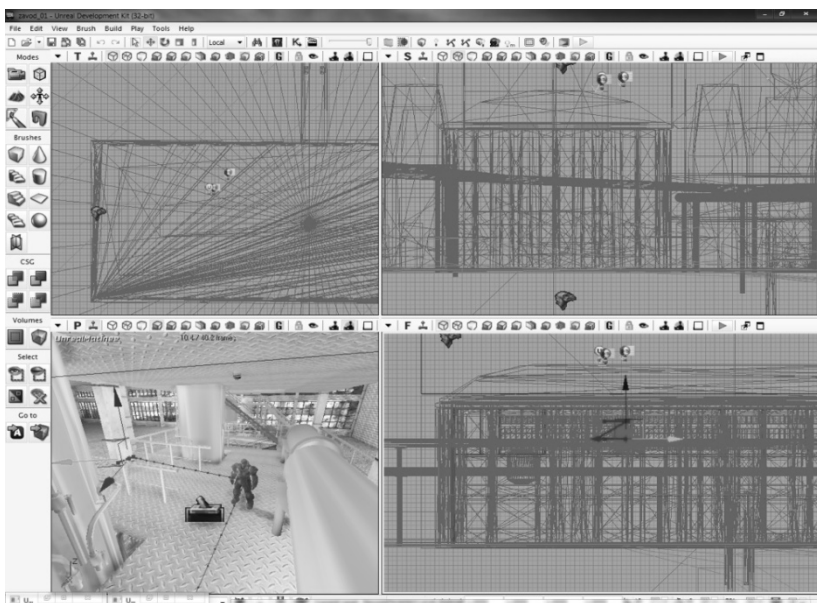
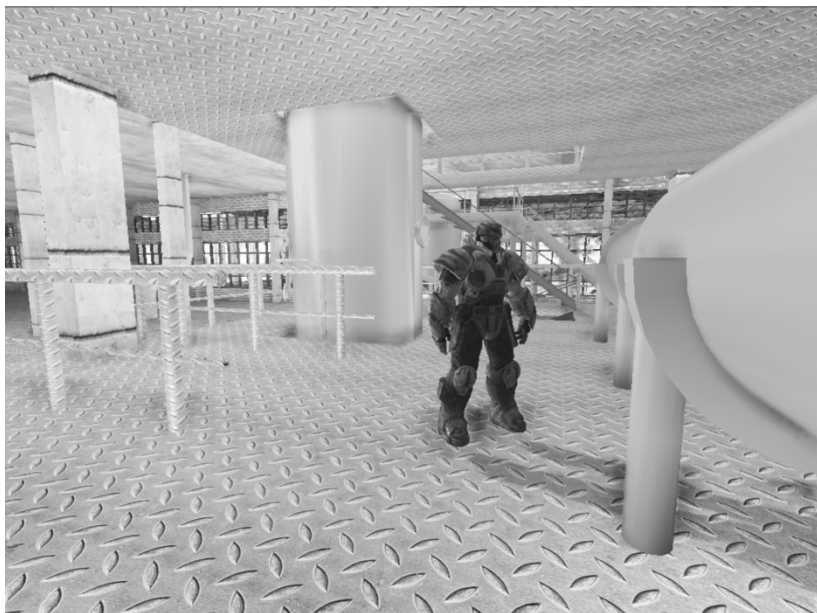


Рис. 10.2. Примеры элементов множества *SkM*

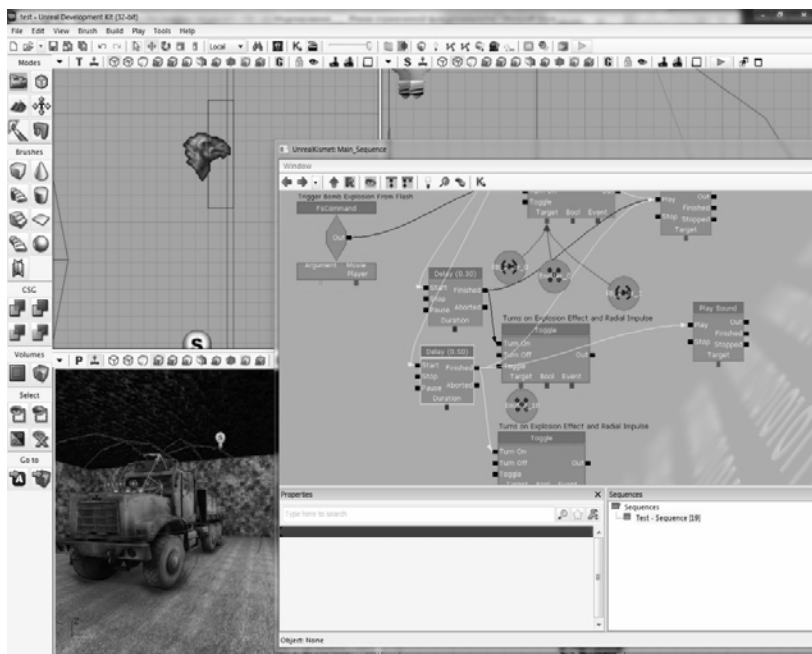


Рис. 10.3. Редактор системы частиц в UDK

Множество AS представляет собой совокупность предустановленных анимационных сцен, которые могут быть наложены на элементы множества SkM для их анимации. Например, для визуализации движения модели человека (элемент множества SkM), необходимо наложить на него ранее созданную анимационную сцену ходьбы (элемент множества AS) – рис. 10.4.

Множество TXR . Понятие текстуры используется для описания элементов, составляющих материал объекта. Текстуру можно наблюдать в природе, например, у обычной доски – множество волокон образуют характерный рисунок. Многие металлические и керамические материалы также имеют текстуру. В данном случае элементом множества TXR может быть изображение в формате png, tga, jpg, bmp .

Множество Mat . Множество материалов состоит из совокупности различных элементов, для создания которых используются комбинации текстур (карты нормалей, блеска, прозрачности) и различных параметров (смещение, смешивание и др.) Таким образом, при создании материала в UDK удаётся достичь максимально приближённого соответствия изображения материала реальному прототипу. Кроме того, предусмотрена возможность анимации текстур материала, которая, например, даёт возможность создания эффекта движения воды в дождь или анимация кислотной среды в аппарате (рис. 10.5).

Множество SC . Совокупность всех звуковых сигналов образует множество SC . Звуковые дорожки могут быть импортированы в форматах mp3, wav. Для звукового оформления виртуального производственного пространства используются звуки работы аппаратов, окружающей среды, журчания воды, дождя, грома, взрывов, голоса диктора, шагов и многие другие.

Множество Lh . Множество источников света Lh образовано тремя подмножествами:

- LhP – подмножество точечных источников (PointLights), свет от которых равноудален по экспоненте во все стороны пространства и так же затухает;
- LhS – подмножество направленных источников (SpotLights), свет от которых распространяется в одну сторону под заданным радиусом;
- LhD – подмножество источников (DirectionLights), свет от которых по характеристикам схож с солнцем и может меняться, например, в соответствии со временем суток.

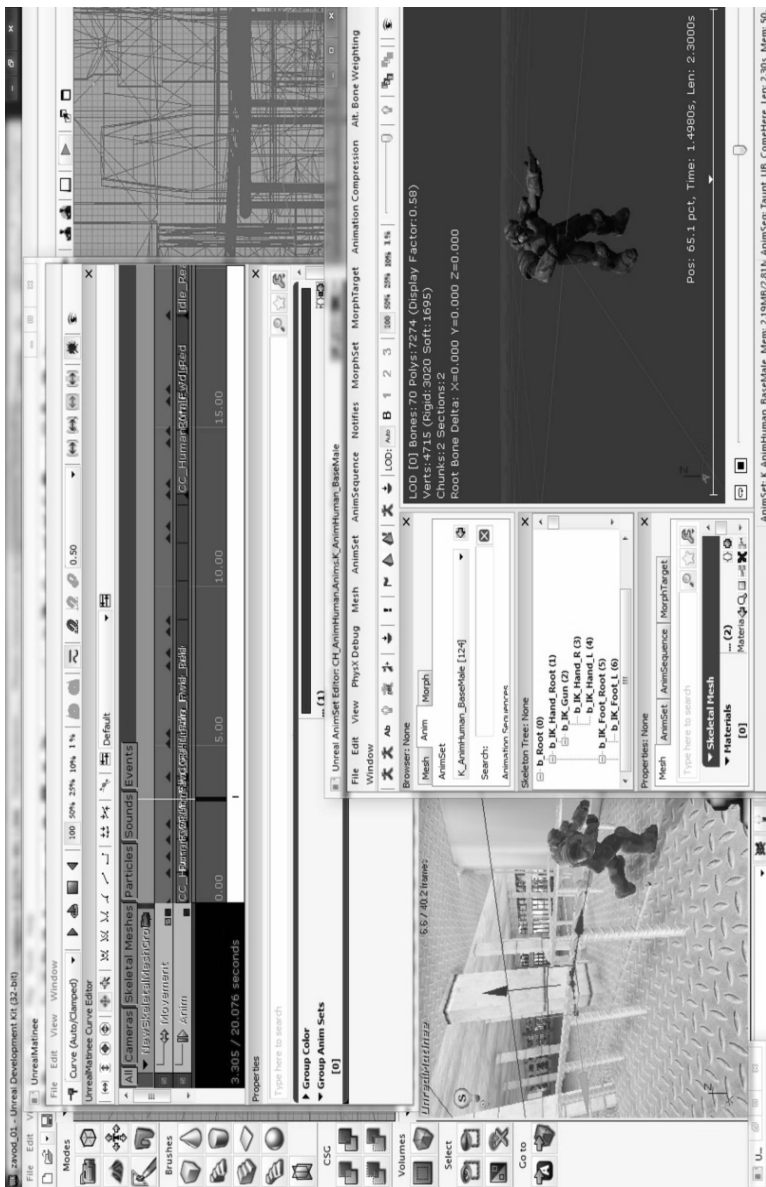


Рис. 10.4. Привязка анимации к скелету

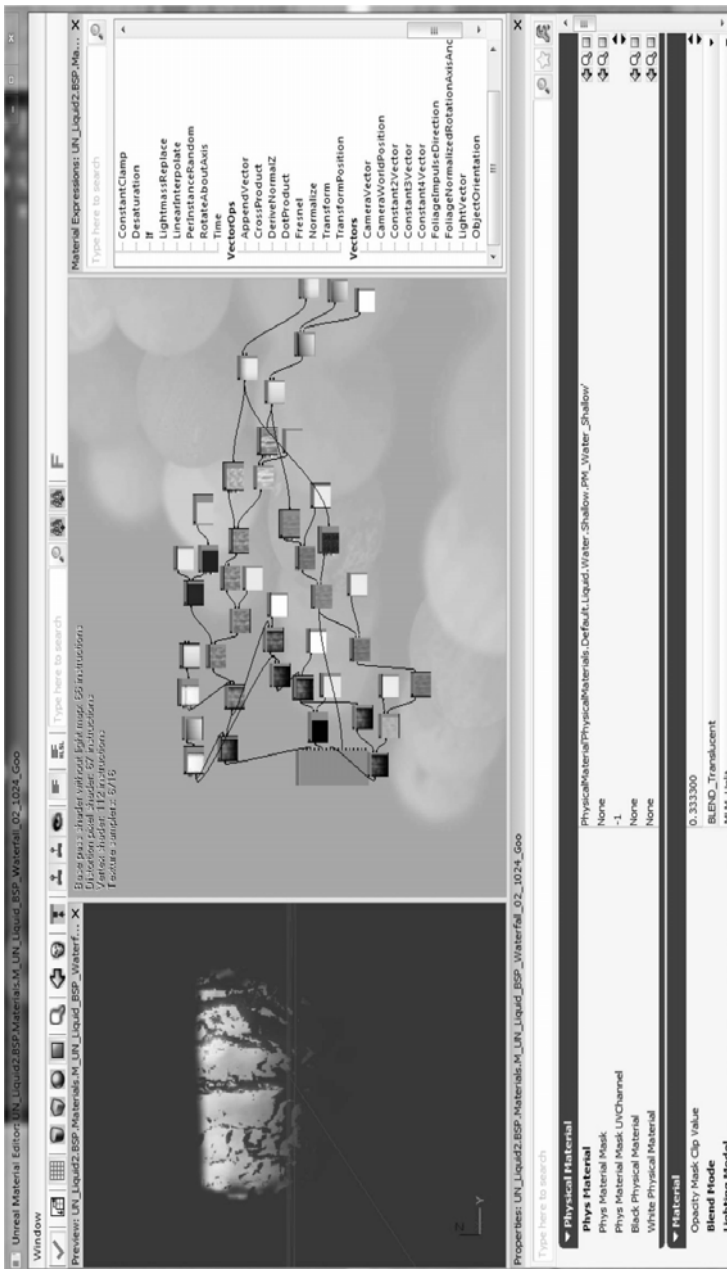


Рис. 10.5. Редактор материалов в UDK

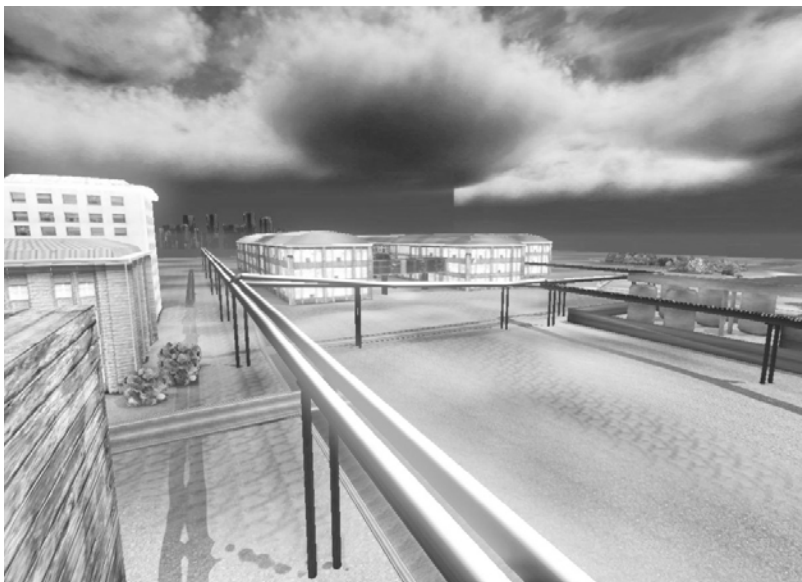


Рис. 10.6. Иллюстрации интерактивного виртуального тренажёрного комплекса



Рис. 10.7. Иллюстрации интерактивного виртуального тренажёрного комплекса

При проведении исследований по разработке виртуального тренажёрного комплекса для обучения персонала химико-технологического предприятия была разработана интерактивная 3D-модель производственной площадки, включающая (рис. 10.6 и 10.7):

- ландшафт местности, водоёмы, растительные насаждения, транспортные коммуникации;
- здания, строительные конструкции, межцеховые коммуникации, теплотрассы, емкости-накопители;
- цеховые производственные и вспомогательные помещения;
- основное и вспомогательное технологическое оборудование, трубопроводы, площадки обслуживания, пульта управления техническими системами (для производства нефтеполимерной олифы).

Интерактивная 3D-модель производственной площадки, как компонент виртуального тренажёрного комплекса, используется для обучения персонала основам реализации технологического процесса и управления технической системой; получения практических навыков работы с объектом как в штатных режимах функционирования, так и для предупреждения, локализации и ликвидации аварийных ситуаций. Наличие 3D-компонента представляет дополнительную возможность для персонала в интерактивном режиме ознакомиться с технологическим оборудованием, производственными помещениями, действиями по предотвращению аварий и планами эвакуации. Высокое качество визуализации, требуемый уровень детализации, реалистичность модели позволяют повысить уровень профессиональной подготовки персонала и уменьшить негативное влияния человеческого фактора на надёжность функционирования технической системы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какова актуальность разработки виртуальных тренажёров для обучения персонала промышленных предприятий?
2. Перечислите объекты виртуального производственного пространства.
3. Каким образом моделируется ландшафт в виртуальном рабочем пространстве?
4. Что входит в состав множества объектов BSP-геометрии?
5. Перечислите типы столкновений для статических моделей объектов?
6. Какие подмножества входят в состав множества источников света?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 10

1. *Карпушкин, С.В.* Применение виртуальных тренажёров для обучения студентов химико-технологического профиля и повышения квалификации персонала химических предприятий / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, Ю. В. Чаукин // Открытое образование. – 2005. – № 6. – С. 51 – 54, 96.
2. *Краснянский, М. Н.* Системный подход к проектированию автоматизированной информационной системы обучения студентов и тренинга операторов химико-технологических систем / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 926 – 935.
3. *Интеграция* виртуальных тренажёров в процесс обучения операторов технических систем с использованием Интернет-технологий / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, А. В. Остроух, Д. Л. Дедов // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2010. – № 7. – С. 38 – 49.
4. *Краснянский, М. Н.* Интернет-технологии в инженерном образовании. Автоматизированные лабораторные практикумы и виртуальные тренажёры / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов. – Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KF, 2010. – 132 с.
5. *SpeedTree®*: [сайт]. – URL : <http://www.speedtree.com/> (дата обращения: 27.11.2010).
6. *Static Meshes* – Wikipedia®: [сайт]. – URL : http://en.wikipedia.org/wiki/Static_mesh (дата обращения: 05.12.2010).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие посвящено теоретическим, практическим и методическим вопросам создания автоматизированных систем, предназначенных для проектирования и управления объектами химического и машиностроительного профиля. Оно состоит из четырёх частей, содержащих:

- общие сведения о системах автоматизированного проектирования технологического оборудования (ТО) и геоинформационных системах проектирования и эксплуатации технических объектов;
- структуру, функции и приёмы работы с автоматизированными информационными системами (АИС) компоновок ТО, технологических расчётов теплообменного оборудования, автоматизированного составления графиков планово-предупредительных ремонтов ТО;
- методику применения средств мультимедиа при создании АИС обучения персонала предприятий химического и машиностроительного профиля;
- сведения о постановках задач, методах их решения и программных средах, используемых при автоматизированном проектировании технологического оборудования;
- теоретические основы поиска режимных и конструктивных характеристик технологического оборудования;
- методики проектирования тренажёрного комплекса для обучения персонала технической системы.
- методику краткосрочного прогнозирования производительности основного оборудования технических систем;
- методику расчёта и выбора механических перемешивающих устройств вертикальных ёмкостных аппаратов;
- моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе;
- технологию автоматизированного синтеза системы оборотного водоснабжения химического предприятия;
- комплекс виртуальных тренажёров для обслуживающего персонала систем подготовки и очистки воды;
- технологию исследования химико-технологических объектов в режиме удаленного доступа;
- технологию интерактивного 3D-моделирования при создании виртуальных тренажерных комплексов и др.

Авторы надеются, что предлагаемое пособие будет полезно для студентов специальности 151701 "Проектирование технологических машин и комплексов", и направления 150700 "Машиностроение", а также аспирантов, проводящих исследования в области оптимального проектирования и управления техническими объектами.

Учебное издание

НЕМТИНОВ Владимир Алексеевич
КАРПУШКИН Сергей Викторович
МОКРОЗУБ Владимир Григорьевич
МАЛЫГИН Евгений Николаевич
ЕГОРОВ Сергей Яковлевич
КРАСНЯНСКИЙ Михаил Николаевич
БОРИСЕНКО Андрей Борисович
ФРОЛОВА Татьяна Анатольевна
НЕМТИНОВА Юлия Владимировна

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
И УПРАВЛЕНИИ
ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Часть 4

Учебное пособие

Редактор З. Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию О. М. Гурьянова

ISBN 978-5-8265-1241-8



Подписано в печать 28.01.2014.
Формат 60×84 / 16. 9,3 усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 31

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВПО "ТГТУ"
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru