

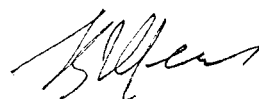
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Р С С Р

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНСОВЕТА

На правах рукописи

Щеглов Виталий Николаевич



УДК 66.012-52

Алгебраические модели конструктивной
логики для управления и оптимизации
химико-технологических систем

Специальность 05.13.07
автоматическое управление
и регулирование, управление
технологическими процессами
(промышленность)

Диссертация на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н. Сотников В.В.

Ленинград - 1983

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава I. Состояние проблемы.	8
I.1. Актуальность проблемы.	8
I.2. Цель работы.	10
I.3. Литературный обзор	11
I.4. Обоснование выбранного направления работы и постановка задачи.	25
I.5. Выводы к главе I	30
Глава 2. Разработка алгебраических моделей конструктив- ной логики и общие вопросы их применения. . . .	32
2.1. Конструктивная логика и семантика исследуемых объектов.	32
2.2. Основные принципы построения алгебраических моделей конструктивной логики.	35
2.3. Условия управляемости и устойчивости систем, отображаемых АМКЛ.	43
2.4. Определение общих динамических систем, отобра- жаемых АМКЛ	45
2.5. Аппроксимация АМКЛ рядами Эрмита и метод эрмитовых моделей	53
2.6. Выводы к главе 2.	56
Глава 3. Описание алгоритма построения АМКЛ.	58
3.1. Описание этапов построения АМКЛ.	58
3.2. Пример.	63
3.3. Пример для сравнения с комитетным методом. . .	66
3.4. Выводы к главе 3	67

Глава 4. Построение и исследование АМКЛ с целью управления, оптимизации или проектирования некоторых ХТС.	69
4.1. Выявление причин, влияющих на содержание воды в метаноле-сырце в промышленных условиях . . .	69
4.2. Исследование содержания ацетилена на выходе цеха окислительного пиролиза природного газа . . .	83
4.3. Анализ смесей бензола, толуола и хлорбензола по спектрам поглощения.	95
4.4. Построение технологической модели флотации фосфоритной руды.	98
4.5. Построение технологической модели флотации калиевой руды.	106
4.6. О программной реализации АМКЛ.	120
4.7. Оптимизация производства кинола ЭД и сравнение интервальной и упрощенной форм АМКЛ . . .	120
4.8. Выводы к главе 4	129
Выводы	131
Литература.	134
Приложения	142

ВВЕДЕНИЕ

С усложнением в настоящее время химико-технологических процессов, функционирующих, во многих случаях, в условиях неопределенности, описываемых большим количеством переменных и имеющих сложные взаимосвязи, с трудом поддающихся аналитическому описанию, большое значение имеет разработка формальных методов, позволяющих осуществлять управление и оптимизацию таких процессов как на стадии проектирования, так и при их эксплуатации в режиме нормального функционирования.

Проблема разработки высокоэффективных технологических процессов является одной из актуальных проблем, необходимость решения которой отмечается в решениях XXVI съезда КПСС, где предусматривается расширение автоматизации проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ с применением ЭВМ, развитие математической теории и повышение эффективности ее использования в прикладных целях.

Цель диссертационной работы заключается в создании формальных методов анализа, управления и оптимизации сложных объектов, функционирующих в условиях информационной неопределенности, позволяющих решать указанные выше задачи без проведения активных экспериментов. Новизна данной работы состоит в разработке методов, которые более эффективно по сравнению с широко применяемыми на практике методами выявляют в вышеуказанных объектах определенного рода алгебраическую структуру на множестве отдельных состояний этих объектов. Знание этой структуры позволяет разработать более эффективную форму автоматизации отображения каждого объекта как системы, состоящей из отдельных подсистем, с возможностью дальнейшей детализации структуры, что приводит к лучшей формализации процессов управления и оптимизации, в частности, химико-технологических систем ХТС.

Актуальность данной работы заключается в необходимости срочного решения проблемы разработки высокоэффективных технологических процессов, что связано не только с ускорением построения более адекватных их моделей, но и более глубоким пониманием как физико-химической, так и информационной природы исследуемых процессов, протекающих, как правило, в условиях помех для выполнения цели и дефицита информации.

В диссертационной работе автором защищаются следующие основные методы, с помощью которых реализуется анализ, управление и оптимизация сложных систем и, в частности, ХТС:

1. Метод построения алгебраических моделей конструктивной логики (АМКЛ) для сложных объектов, функционирующих в условиях информационной неопределенности (неполноты данных).
2. Метод качественного анализа ХТС с помощью АМКЛ в булевой форме (метод "булевых моделей").
3. Методы анализа, управления и оптимизации ХТС с помощью АМКЛ в интервальной форме.
4. Метод адаптации системы управления к новым значениям неуправляемых переменных ("моделирование внешних возмущений").
5. Метод вычисления интервалов рекомендуемых значений всех переменных, не вошедших в формулы АМКЛ "вычисление контекста АМКЛ".
6. Метод построения многокритериальных АМКЛ.
7. Метод построения аналитических моделей, аппроксимирующих подмножества данных, соответствующих АМКЛ метод "эрмитовых моделей".

Предлагаемая работа состоит из четырех глав.

В главе I исследуется состояние проблемы, ее актуальность, цель работы, приводится подробный аналитический обзор литературных данных, обоснование выбранного направления работы и

постановка задачи. В главе 2 разрабатывается теория АМКЛ, условия управляемости и устойчивости соответствующих систем, дано определение общих динамических систем, отображаемых с помощью АМКЛ, дан способ аппроксимации АМКЛ рядами Эрмита. В главе 3 дано подробное описание алгоритма построения АМКЛ, приведен простой целочисленный пример построения АМКЛ и рассмотрен пример, который решается как с помощью АМКЛ, так и с помощью комитетного метода распознавания образов. В главе 4 даются конкретные примеры построения и исследования АМКЛ с целью анализа, управления, оптимизации или проектирования некоторых УТС - синтеза метанола, ацетилена, хинола, анализа сложных смесей, процессов флотации фосфорита и сильвинита. дается сравнение АМКЛ с моделями, полученными с помощью метода главных компонент и метода группового учета аргументов. В приложениях изображены обобщенная блок-схема алгоритма и программа построения АМКЛ, а также образец исходных данных, использовавшихся для конкретного сравнения метода АМКЛ и других методов.

Разработанные в диссертации методы были использованы совместно с РФ НИОПИК для улучшения качества и повышения выхода хинола "ЭД" на Березниковском химическом заводе, что позволило получить экономический эффект 250,4 тысяч рублей. Полученному продукту был также присвоен Государственный Знак качества.

Метод построения АМКЛ внедрен также в практику научных разработок нескольких институтов и проектных организаций (Рубежанский филиал НИОПИК, ЛТИ, Украинский заочный политехнический институт, Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт, Щекинский филиал ОКБА и другие), а также включен в монографию [79]. Программа построения АМКЛ передана в Отраслевой фонд алгоритмов и программ.

Материалы диссертации апробированы в публичных выступлениях

на Научном Совете по комплексной проблеме "Кибернетика" при АН СССР, М., 1971 г., на VIII Всесоюзном съезде по спектроскопии, Минск, 1971 г., на I Всесоюзной конференции по динамике процессов и аппаратов химической технологии, Воронеж, 1982 г., а также на семинарах кафедры дискретной математики МГУ и отдела распознавания образов Вычислительного центра АН СССР.

Основные результаты исследований, проведенных по данной работе, изложены в публикациях [57], [58], [62-64], [74], [75], [81].

ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

I.I. Актуальность проблемы

При решении проблемы моделирования сложных технологических систем или информационных ситуаций необходимо распознавать некоторые относительно простые образы или закономерности, которые используются в процессе моделирования и управления.

С лингвистической точки зрения первым этапом для решения этой проблемы является разработка формализованного языка, правила построения выражений которого дают возможность выделить из текста (исходной информации) отдельные "ключевые слова" (образы), смысл (семантика) которых зависит от некоторого сопоставления этих слов цели исследования. Простота этих образов должна соответствовать их относительной независимости от контекста, иначе их трудно использовать в новых условиях (непонимание, возникающее из-за нового контекста). Разрабатываемый язык должен быть удобен для накопления образов, для дальнейшего совершенствования его грамматики по мере "обучения" на новых объектах и для интерпретации этих образов - сопоставления их с подобными образами, полученными на других информационных массивах как с помощью этого формализованного так и с помощью естественного языка. В общем, первый этап решаемой проблемы сводится к поиску смысла информации, которую получают с исследуемого объекта.

Для сложных химико-технологических процессов при формировании обучающей выборки характерна недоопределенность информационных массивов в смысле отсутствия полного перебора значений переменных, определяющих течение процесса. Отсюда следует, что истинность получаемых выводов может зависеть от конкретных особенностей (контекста) исследуемых массивов. Поэтому вторым этапом при решении рассматриваемой проблемы является учет контекста получаемых выводов.

Действительно, как будет далее показано, лишь весьма условно, в рамках данного текста (определенного интервала времени, соответствующего исследованию объекта), получаемые образы могут и не зависеть от контекста, а точнее, их контекст здесь явным образом не выступает (не существенен) для распознавания этих образов в данном тексте. Однако, выявленные закономерности должны использоваться в условиях, как правило, отличающихся от тех, которые имели место в обучающей выборке. Более того, если эти образы используются, например, для информационного поиска в литературных данных с целью проектирования новых систем управления, то несоответствие контекста слов (образов) здесь будет иметь решающее значение ("не тот смысл" образа, парадокс).

Вкратце эту проблему надо назвать проблемой поиска непротиворечивого контекста смысла информации, которую получают с исследуемого объекта. Отсюда, естественно, следует проблема организации диалога "человек-машина" или конструирования дуального управления, что во всех этих случаях позволяет "понять" смысл образов - найти подходящий, приемлемый (по крайней мере для двух сторон) контекст образов. Вышерассмотренные этапы частично решены в кибернетике, для достаточно сложных объектов, однако, необходимы дальнейшие исследования в этих направлениях. Решаемые до сих пор традиционные задачи управления относились к сравнительно простым объектам. В этом случае подобная зависимость от контекста объекта может приводить к многозначности получаемых результатов. Частичное решение перечисленных этапов - нахождение смысла и контекста получаемых выводов - помогло бы значительно улучшить качество моделирования сложных объектов, что и подтверждает актуальность настоящей диссертационной работы.

1.2. Цель работы

Как уже отмечалось, общей целью работы является создание формальных методов анализа управления и оптимизации сложных объектов, работающих в условиях информационной неопределенности, позволяющих решать указанные выше задачи без проведения активных экспериментов. Приведенные в предыдущем подразделе этапы достижения этой цели (разработка некоторого формализованного языка и учет его контекста) являются слишком общими. Анализ научных данных по этой проблеме, приведенный в следующем подразделе, показывает, что таким языком может быть определенного вида логико-математический язык Ω (конструктивное исчисление предикатов), на котором упорядоченное множество данных, получаемых с объекта, представляется в виде псевдобулевой алгебры, с помощью которой достаточно эффективно удастся отобразить синтаксис и семантику языка Ω . С учетом этого, цель исследования сложных ХТС в рамках настоящей работы сводится к разработке и исследованию алгебраических моделей конструктивной логики для управления и оптимизации химико-технологических процессов. Это ограничение не является решающим, однако сразу же заметим, что предлагаемые далее построения и семантические соглашения основаны на обобщении достаточно большого числа примеров, взятых из химической промышленности.

В теоретическом плане новизна также представляется, как распознавание образа – была опознана (среди многих) такая система понятий и операций (псевдобулева алгебра Бета-Крипке), которая является как бы переводчиком с языка данных (объекта) на почти естественный язык человека. В практическом плане новизна здесь скорее в новой семантике. В рамки известной алгебраической структуры (синтаксиса) заложен новый смысл, сделаны новые семантические соглашения, приводящие к практической цели – разработке

метода, более удобного, чем традиционные (инженерные) способы обработки информации для выявления смысла выводов (концептуальной информации [1]), а также для выявления контекста и интерпретации этих выводов.

1.3. Литературный обзор

В обзоре проводится анализ литературных источников, которые имеют отношение к достижению цели исследования.

Прежде всего рассмотрим задачу восстановления регрессии [2], которая является одной из основных задач классической прикладной статистики. Эта задача соответствует идее интерпретации результатов экспериментов или наблюдений в наиболее простом виде – какие выводы из наблюдений соответствуют природе явления, а какие – зависят от случайных ошибок. Достаточная устойчивость восстановления регрессии возможна лишь при использовании выборок большого объема и малого числа (примерно до 6 [3]) переменных. При их большем числе определитель системы нормальных уравнений обычно бывает очень мал, что влечет неопределенность в определении параметров регрессии. Успешное решение задачи восстановления регрессии может быть гарантировано в случае равномерного отклонения средних от их математических ожиданий. Такие отклонения могут иметь место, если существует ограничение на величину потерь $\sup (y - \bar{F}(x, \alpha))^2 \leq \tau$,

где y – значение выхода (цели), $\bar{F}(x, \alpha)$ – класс функций, наиболее близких к регрессии $y(x)$, т.е. к условному математическому ожиданию y , x – значение входа, α – параметр.

Это требование весьма существенно будет далее использоваться.

И, наконец, при выполнении вышеуказанных условий требуется, чтобы множество $\bar{F}(x, \alpha)$ имело конечную емкость – максимальное число пар x_j, y_j , где $j=1, \dots, m$ – число точек (или векторов), которые всеми возможными способами можно разбить на два класса

(по значению y) с помощью некоторого решающего правила:

$\theta((y - F(x, d))^2 + \beta)$, где β — также параметр. Например, один класс может быть из векторов X_j , для которых $F(x, d)$ близок к y_j , а второй класс — далек от y_j . Последнее правило (конечная емкость для F) будет также использоваться далее.

В условиях малой выборки минимизацию риска $1/m(\sum_{j=1}^m (y_j - F(x_j, d))^2)$ целесообразно проводить методом упорядоченной минимизации [2]. Для этого на множестве функций надо задать структуру, а затем найти такой элемент структуры и в нем такую функцию, которые доставляют наименьшую оценку риску. При восстановлении регрессии на малых выборках решение с меньшей оценкой риска может быть получено за счет селекции выборки — исключения из обучающей последовательности нескольких элементов (векторов) с тем, чтобы с помощью оставшегося множества найти функцию, доставляющую меньшую величину среднему риску.

При решении задачи восстановления значений функции в заданных точках упорядочение следует осуществлять на классах эквивалентности функций, которые определяются структурой полной выборки векторов X_j . Селекция выборки позволяет за счет отказа от прогнозирования значений функции в некоторых заданных точках увеличить точность прогноза значений функции в остальных точках.

Сопоставляя все эти сведения о регрессионном методе с вышеприведенными целями, следует сказать, что этот метод плохо приспособлен для генерации новых качественных гипотез [4] (по предыдущей терминологии для получения смысла некоторого множества выводов, его контекста, легкости интерпретации и т.п.). Однако, этот метод достаточно эффективен для проверки уже известных гипотез. Трудно заведомо указать ограничение на величину потерь, что ведет к неопределенности сведений о равномерности отклонения средних от математических ожиданий. Трудно

формализовать задание такой априорной структуры на множестве используемых функций, по которой можно было бы найти функции, доставляющие наименьшую оценку риску. Эта же трудность имеется в желаемой селекции выборки и, соответственно, в поисках классов эквивалентности функций, определяемых структурой выборки векторов X_j . По-видимому, регрессионный метод достаточно эффективен как для проверки гипотез, так и для аналитической записи, отображающей "внутреннюю" связь элементов множества, соответствующего некоторой уже известной структуре (образу).

Сразу же рассмотрим подобные методы параметрической статистики в задаче распознавания образов. Подобно предыдущему методу, успешное решение задачи обучения распознаванию образов с помощью метода минимизации риска (эмпирического) может быть гарантировано в условиях существования равномерной сходимости частот к вероятностям по классу событий. Эта сходимость имеет место, когда емкость решающих правил ограничена. Алгоритмы обучения распознаванию образов способны обучаться, если эта емкость мала по отношению к объему обучающей выборки и выбирается правило, которое доставляет величине риска малое значение [25-27], [52].

Сходными методами решается задача таксономии-разделения множества X_j на такие подмножества, чтобы они не пересекались.

Оценивая методы параметрической статистики в применении к распознаванию образов, отметим здесь некоторое приближение к ранее поставленной цели - выявлению заранее известного числа образов (гипотез). Однако здесь (и в задаче таксономии) налицо тесная связь с постановщиком задачи - он является учителем, определяющим заранее (и часто субъективно) эти образы, в то время как желательно иметь гипотезы, происхождение которых зависело бы лишь от самого объекта исследования. Остальные замечания здесь аналогичны тем, которые были сделаны по отношению

к регрессионному методу.

При исследовании статистической динамики систем с переменной структурой используется теория марковских случайных процессов с поглощением (переключением) реализаций из одного детерминированного состояния в другое [19]. Эти переходы являются случайными, зависящими от времени и некоторых текущих координат процесса. При этом соответствующие общие алгоритмы включают необходимость решения систем обобщенных уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова. Практическая реализация этих алгоритмов трудна, поэтому здесь важное значение имеют приближенные алгоритмы, которые более просто реализовать на ЭВМ. Трудности этого метода заключаются в отсутствии генерации самой структуры — ее приходится задавать извне с помощью других методов или просто с помощью инженерного (содержательного) подхода. Однако перспективность систем с переменной структурой огромна [20]. При моделировании и оптимизации сложных эволюционирующих систем средствами итерационных процессов математического программирования, приспособленных к учету нестационарности тех или иных элементов модели [22], исследовались процессы, порожденные отображением вида $\varphi \in \{R^n \rightarrow R^n\}$, для которого $M(\varphi) = \{x | x = \varphi(x)\}$ — множество неподвижных точек оператора φ и $|z - y| < |x - y|, \forall z \in \varphi(x), \forall y \in M(\varphi), \forall x \notin M(\varphi)$. Другими словами, оператор φ осуществляет сжатие множества x . Элементы, которые обладают требуемым свойством, обозначаются через y , а результат действия φ — через z . Используется также понятие размытого решения в форме системы точек, для которых всякому требуемому ограничению удовлетворяет более половины элементов исследуемого множества (понятие комитета).

При использовании факторного анализа на многообразиях Грассмана [28] исследуется пространство всех k -мерных пространств из E^n , на котором заранее заданы непересекающиеся

образы (классы входных векторов). Далее образуется множество разностных векторов между реализациями различных классов. С помощью этого множества параметризуется некоторая заданная функция потерь. Затем среди всех подпространств $E^k \subset E^n$ находят такое (с минимальным k), что функция потерь на нем минимальна. Этот метод успешно работает в пространствах большой размерности (до $n = 500$ на машинах средней мощности) и позволяет формировать новые качественные гипотезы. Однако, как и в [5] здесь не вводится упорядочение на множестве реализаций (относительно некоторого локального времени), поэтому смысл получаемых выводов истинны лишь при некоторых допущениях, зависящих от способа формирования функции потерь. В частности, в условиях информационной неопределенности может быть случай, когда абсолютный минимум функции потерь может и не иметь физического смысла как и в регрессионном анализе. Подбор таких реализаций (и определенных подпространств E^k) может и не отображать действительного положения дел — при сравнительно удаленных реализациях значения целевой переменной могут зависеть, например, от незарегистрированных переменных.

Предыдущее изложение основных фактов, связанных с моделированием сложных объектов в условиях информационной неопределенности приводит к выводу, что, например, сопоставление каждой целевой ситуации со своей ближайшей временной окрестностью, должно привести к проведению операций в пространстве, которое может весьма отличаться от евклидова пространства. Каждое сопоставление со своей окрестностью, очевидно, можно уподобить операциям в некотором локально евклидовом пространстве. Связь этих локальных пространств надо еще установить. В связи с этим полезны операции, вводящие на структуру исходных данных клеточное (CW) разбиение [33], которое гомотопически эквивалентно

некоторому сепарабельному (со счетной базой) гладкому многообразию. Смысл этих операций следующий. В случае успешного разбиения исходных данных (при рассматриваемой постановке задачи) условиям информационной неопределенности соответствует риманово пространство, т.е. такое пространство, на котором задано поле метрического тензора (существует как бы некоторая кривизна этого пространства). С помощью этого тензора можно определить соответствующее касательное евклидово пространство (соответствующее каждой целевой ситуации). В итоге, если исследуемое пространство риманово, то для исследования объектов, находящихся в условиях информационной неопределенности можно использовать весь богатый аналитический аппарат теории римановых пространств в частности, здесь автоматически следует теорема редукции, сводящая исследование пространства кривых (любых двух точек – целевых ситуаций в римановом пространстве) к исследованию некоторых конечно-мерных многообразий, что должно способствовать облегчению интерпретации получаемых выводов.

В общей теории случайных процессов [34], обобщающей исследования [35] вводится понятие наименьшей мозаики $\hat{\mathcal{E}}$ – совокупности подмножеств некоторого множества данных E , замкнутых относительно объединений и пересечений некоторых счетных последовательностей из E , и содержащую любые другие покрытия $\mathcal{E}$ из E . Далее, совокупность $\mathcal{C}$ множеств из E называется $\mathcal{I}$ -системой, если она состоит из "крупных множеств" – если A входит в $\mathcal{C}$ и B содержит A , то и B входит в $\mathcal{C}$. Далее, если (A_n) – возрастающая последовательность из E и $\bigcup_n A_n$ входит в $\mathcal{C}$, то существует такое k , что и A_k входит в $\mathcal{C}$. Эта система называется дихотомической, если для всякого $A \in \mathcal{I}$ существует два непересекающихся множества $\mathcal{P}_0(A)$ и $\mathcal{P}_1(A)$ такие, что $A \cap \mathcal{P}_0$ и $A \cap \mathcal{P}_1$ принадлежат $\mathcal{C}$. Пусть A – элемент из $\hat{\mathcal{E}} \cap \mathcal{P}_0$, где $\mathcal{C}$ – дихотомическая $\mathcal{I}$ -система.

Тогда существует бесконечное семейство (K_i) попарно непересекающихся элементов покрытия $\mathcal{E}$, содержащихся в Λ , причем K_i есть пересечение некоторой убывающей последовательности элементов из $\mathcal{E} \cap \mathcal{C}$ и объединение всех K_i является элементом K из $\mathcal{E}$, содержащихся в Λ . Все эти суждения о I-системе будут весьма существенно использованы для построения предлагаемого алгоритма. В частности, будет реализован так называемый скрепер Серпинского [35] – последовательность отображений $f_n: [B(E)]^n \rightarrow B(E)$, где $B(E)$ – совокупность всех подмножеств из E , для которых $f_n(P_1, \dots, P_n) \subset P_n$ и если P_n входит в $\mathcal{C}$, то и $f_n(P_1, \dots, P_n)$ входит в $\mathcal{C}$ (P_n – множество размерностью n). Последовательность f_n как бы сглаживает множество P_n (преобразует в множество с меньшей размерностью), причем результат не может быть пустым.

Теория дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ) [37] исследует проблемы минимизации булевых функций $f(x_1, \dots, x_n) \in E^2 = \{0, 1\}$, аргументы которых также определены на множестве $\{0, 1\}$. В частности, таблица размерностью $n \times m$, где m число строк (двоичных векторов) и соответствующий столбец $1 \times m$ двоичных значений целевой переменной может быть преобразована (минимизирована) в тупиковую ДНФ, $y = \bigvee_{i=1}^s K_i$, где невозможно удалить ни одну элементарную конъюнкцию K_i , или какую-либо переменную из $K_i = x_{i_1} \wedge x_{i_2} \wedge \dots \wedge x_{i_r}$ без того, чтобы не нарушилось равенство $y = \bigvee_{i=1}^s K_i$ на всех m строках. На степень минимизации (например, общее число переменных) здесь сильно влияет выбор упорядочения строк таблицы $n \times m$. Следует отметить, что минимальные (и в частности) тупиковые ДНФ формализуют логический вывод от частного к общему в наиболее простом случае – когда информации можно придать значения двоичных переменных.

Трудности минимизации булевых функций общеизвестны.

В случае слабо определенных булевых функций (заданных на относительно небольшом числе элементов булева пространства, что характерно для сложных объектов) удастся получить тупиковые ДНФ при $n = 32$ и числе булевых векторов, равным 700, примерно за 59 минут на машине М-20, [38]. В данном случае используется метод конкурирующих интервалов. Здесь осуществляется параллельное построение искомой системы конъюнкций с постепенным понижением из ранга (числа переменных), причем вектора сравниваются между собой в порядке их естественного упорядочения (как они записаны в исходной таблице). Поскольку этот порядок несущественен для достижения большой минимальности использовалась рандомизация этого порядка (время, затраченное на это не включено в вышеприведенный пример). Тупиковые ДНФ часто используются для автоматизации проектирования сложных логических структур [39], [40], причем здесь большое значение придается направленным (не переборным) методам поиска тех тупиковых форм, которые образуют минимальную ДНФ (с целью простоты приборной реализации исходной информации, отображаемой минимальной ДНФ). Однако задача упрощается (по отношению к работе [40]), если цель исследования — построение логической (булевой) модели объекта в условиях недостатка информации. В этом случае приходится придавать большее значение тем конъюнкциям из ДНФ, которые имеют большую оценку — соответствующие области или интервалы включают большее число точек (векторов) исходного хаусдорфова пространства.

Весьма полезной топологической конструкцией, с которой дальше придется иметь дело, являются классические универсальные векторные расслоения и, в частности, расслоения Грассмана [42] — тройки вида $T(m, n), \mu, G(m, n)$, где $T(m, n)$ — подмножества

("слои") из $G(m, n) \times R^m$, $G(m, n)$ — всевозможные n -мерные плоскости из R , проходящие через 0 и $p\pi$ — проекция (непрерывное отображение) пространства T в пространство G . Слои T являются m -мерными евклидовыми пространствами. В частности, если есть возможность "сглаживания" подпространств, соответствующих конъюнкциям ранга m (при общем их числе n), и если провести такое преобразование всех координат для x_i , чтобы некоторая нижняя граница всех значений соответствовала началу координат, то полученная конструкция будет соответствовать расслоению Грассмана. Каждый слой, размерность которого обычно меньше размерности исходного пространства, будет здесь являться некоторым "образом", интерпретация которого будет облегчена. Конечно, в данном случае все зависит от свойств исследуемого пространства (полагаем, что ДНФ здесь может быть получено путем некоторого разбиения этого пространства). В частности, исследуемое пространство должно обладать некоторыми свойствами гладкости (дифференцируемости) и, соответственно, аппроксимирующие функции должны обладать этими свойствами. В данном случае весьма удобны разложения подпространств, соответствующих конъюнкциям из ДНФ, в ряды функций Эрмита [41]. С помощью этих рядов может быть заранее отображена и испробована с аппроксимационными целями любая степень гладкости, поскольку с помощью рядов Эрмита отображается любая обобщенная функция [41] медленного роста с интегрируемым квадратом. Практически эти функции удобны тем, что вне области определения аргументов они стремятся к нулю. Другое топологическое свойство, которое будет использоваться далее в исследуемых структурах, это понятие гомотопии, которое удачно отображает свойство непрерывности исследуемого объекта по отношению к некоторой ограниченной интервалом $I = [0, 1]$ заранее выбранной переменной. Непрерывные отображения $f': X \rightarrow Y$ и $f: X \rightarrow Y$ гомотопны, если существует такое

непрерывное отображение $F: X \times I \rightarrow Y$, что $F(x, 0) = f(x)$, $F(x, 1) = f'(x)$ [42, 43]. В данном случае единичный интервал могут заполнять значения переменной, отображающей, например, окрестность некоторого заранее выбранного "целевого" состояния объекта. Именно гомотопные между собой отображения представляют слои расслоений Грассмана, которые далее будут использоваться. В данном случае каждый слой образует приблизительно $m/2$ -мерную гомотопическую группу пространства X в точке x_0 , соответствующую одному из многих целевых векторов. Поиск именно гомотопических групп ("образов") является наиболее приемлемым при исследовании объектов в условиях информационной неопределенности — гомотопия представляет собой как бы признак однородности некоторых определенных состояний такого объекта. Одним из наиболее важных источников новых идей, способствующих решению сложных вопросов исследования объектов в условиях информационной неопределенности, является теория формальных грамматик [44]. Можно, например, предположить, что информация, получаемая с таких объектов, есть некоторый неизвестный исследователю язык, для которого необходимо установить его грамматику и смысл предложений. Назовем порождающей грамматикой (систему подстановок) упорядоченную четверку $G = (V, \Sigma, P, \epsilon)$, где (применительно к поставленной цели) V — множество всех употребляемых символов, $\Sigma \subseteq V$ — множество переменных (букв), P — множество правил подстановки (преобразований) и $\epsilon \in V - \Sigma$ — символ цели. Символом $*$ будем помечать множества цепочек (последовательностей) из V или Σ или $V - \Sigma$. (Здесь имеется ввиду разность в теоретико-множественном смысле).

Порождающую грамматику G назовем грамматикой непосредственно составляющих (НС-грамматикой), если каждое ее правило имеет вид $u\xi v \rightarrow uv$, где $\xi \in V - \Sigma$, $u, v \in (V - \Sigma)^*$ и $u \in V^* - \{\epsilon\}$, где символ $(\rightarrow)$ означает преобразование (сравнение) цепочек,

т.е. конечных последовательностей, а ε — пустые цепочки.

В частности, например, левая часть преобразования $u\{v \rightarrow uvv$ означает, что на вход этой операции поступает некоторая тройка цепочек, одна из них, имеющая элемент $\{$, может принадлежать к некоторому целевому классу цепочек, а u, v — к классу цепочек, для которых эта цель не выполняется (цепочки сравнения). Будем также считать, что на множестве всех цепочек задана топология и u и v расположены в ближайшей окрестности от $\{$. Пусть также u , v и другие цепочки сравнения упорядочены — задано правило их выбора для сравнения с $\{$. На выходе записывается итог всех преобразований uvv , т.е. указывается цепочка y и цепочки сравнения u и v — контекст, в смысле которого истинен вывод y . Заметим также, что в более общем смысле контекст может включать не только две ближайшие цепочки от $\{$ ("до" и "после"), но и некоторое их множество. В контекстно-свободных языках такого явления нет — вывод (результат преобразований) получается вне зависимости от контекста, хотя последний в неявном виде присутствует всегда. Большинство рассмотренных выше методов (в традиционной постановке) не отвечают требованиям, предъявляемым к НС-грамматикам (т.е. к контекстно-зависимым грамматикам).

Более того, по-видимому, в некоторых случаях методу получения выводов, основанному на НС-грамматике, можно придать свойства рекурсивно-перечислимых множеств (свойства грамматики типа 0) [45]. Оказывается, алгоритмические процедуры можно использовать и для порождения предиката (множества), характеризующегося некоторым набором целых чисел. Поскольку в практических задачах промежуточный переход, например, от десятичных дробей к целым числам, и в конце вычислений — переход к требуемой записи результата — всегда выполним, то здесь можно воспользоваться следующим результатом [36, 46]. Прежде всего

следует задать какой-либо оператор минимизации, который уменьшал бы размерность области определения некоторой функции f , из f_{n+1} в f_n . В качестве такого оператора может служить, например, скрепер Серпинского [34,35]. Далее множество X (пусть будет таблица исходных данных) рекурсивно перечислено тогда, и только тогда, когда существует одноместная рекурсивная функция f , такая, что $X = \{f(n) | n \in \omega\}$, где ω — неотрицательные целые числа. Этой же функции соответствует процесс редукции подмножеств из X . Для любых двух рекурсивно перечислимых множеств X_0 и X_1 (пусть эти множества соответствуют разбиению Y на Y_0 и Y_1) существуют такие рекурсивно перечислимые множества X'_0 и X'_1 , что $X'_0 \subseteq X_0$, $X'_1 \subseteq X_1$, $X'_0 \cap X'_1 = \emptyset$ и $X_0 \cup X_1 = X'_0 \cup X'_1$. Далее, при разработке предлагаемых алгоритмов будет конструироваться именно такая функция.

Отметим еще, что грамматика типа 0, порождающая рекурсивно-перечислимое множество, соответствует автоматическим устройствам весьма общего характера — машинам Тьюринга и в принципе может быть использована для построения математических моделей весьма сложных объектов (естественного языка и т.п.) [23,45–47].

Грамматики типа 0 и I (НС-грамматики) привлекательны тем, что обладают большой объяснительной силой — способностью синтаксической структуры обеспечивать семантическую интерпретацию выводов. Однако использование этих грамматик на практике в значительной степени тормозится отсутствием приемлемых по эффективности и общности алгоритмов анализа таких языков и большим количеством алгоритмически неразрешимых проблем. Кроме того, в НС-грамматике отсутствуют правила преобразования правильно построенных выражений. Иногда, например, удобнее так преобразовать вывод, чтобы управление процессом было бы более удобным (содержало бы управляемые переменные) и лучше интерпретируемым с содержательной точки зрения. Большое значение при исследовании

сложных объектов может иметь интуиционистская или конструктивная логика [48-51]. Эта логика позволяет тонко и точно анализировать трудный и важный вопрос о характере существования объектов исследования и, в частности, как будет показано далее, существуют ли действительно наблюдавшиеся значения некоторых переменных, для которых выполнялась цель исследования. Интересной особенностью некоторых разбираемых далее методов конструктивной логики является возможность принципиально различных алгоритмических толкований логических связок и, частично, других операций. Это позволяет привлечь уже известные математические средства для формализации, например, метода анализа сложных объектов, лишь путем задания точного списка семантических соглашений, т.е. как бы правил игры (между исследователем и объектом), которые необходимо соблюдать и помнить. Польза вводимых далее конструкций (алгебраических моделей, отображающих интуиционистскую логику предикатов) заключается в том, что эти конструкции задают синтаксис языка исследования сложного объекта. Его семантика (смысл операций, производимых над исходной информацией) в наиболее существенной части задается исследователем в зависимости от своих конкретных целей. Роль синтаксиса, т.е. отношений между символами и выражениями языка, играют здесь псевдобулевы алгебры и, в частности, алгебра Бета-Крипке, которая затем используется для построения модели логико-математического языка Ω . Отметим, что ввиду новой семантики, предлагаемые далее модели называются не моделями Бета-Крипке, а более общим выражением-алгебраическими моделями конструктивной логики, их идентификатором может служить, например, соответствующая аббревиатура (АМКЛ).

Отметим еще, что в моделях Бета-Крипке большую роль играет принцип сохранения информации — если некоторое суждение истинно

при определенном состоянии объекта, то оно истинно и в любом более позднем возможном состоянии – зарегистрированный факт остается верным при любом дальнейшем развитии событий.

В заключении этого обзора отметим, что все вышеприведенные данные были специально рассмотрены лишь с точки зрения получения выводов (образов) в условиях информационной неопределенности. Помимо уже приведенных замечаний отметим еще большую вычислительную сложность большинства известных методов, что ограничивает их применение в условиях большой размерности исходного пространства переменных. Для адаптивных алгоритмов [16] необходима априорная информация о помехах. Во всех известных (практически применяемых) методах не используется информация об окрестности каждого состояния системы, т.е. теряется информация о причинах выполнения или невыполнения цели при "дрейфе" нерегистрируемых переменных. Другие работы (CW – разбиения [33], наименьшие мозаики [34], метод форсинга [36]) были приведены потому, что они до некоторой степени разъясняют точку зрения автора на возможность формализации исследований систем в условиях информационной неопределенности и, по-видимому, могли бы быть использованы для этих целей, если бы не относительная сложность и некоторая ограниченность языка этих теорий по сравнению, например, с работой [48].

Теория ДНФ [37] весьма близка исследуемой теме, однако, здесь остаются открытыми весьма важные вопросы квантования исходных вещественных чисел. Точно также остается открытым вопрос о конструктивном способе получения расслоений Грассмана [42]. Для рядов функций Эрмита [41], отображающих соответствующие расслоения, неясен вопрос об удобстве их применения в условиях информационной неопределенности, когда информация "размазана" по многим слоям Грассмана. Теория формальных

грамматик [44,45] отображает лишь некоторые общие, хотя и весьма важные с интуитивной точки зрения качественные факты преобразования информации из одной формы в другую. Теория "понимания" (концептуализация) текстов [1] уделяет основное внимание связям уже осмысленных единиц информации, но не указывается, как можно выделить эти единицы в исходной "зашумленной" информации. Интуиционистская [48] или конструктивная (если не принимать концепции свободно-становящихся последовательностей [49]) логика дает, как это и следует ожидать, лишь общую теорию доказательств (получения конструктивных выводов) и в ней нет достаточно полного перечня правил обработки "зашумленной" и неполной числовой информации.

I.4. Обоснование выбранного направления работы и постановка задачи

Покажем теперь преимущества выбранного направления работы - конструирования и исследования АМКЛ (в смысле [48]) для управления и оптимизации химико-технологических систем (ХТС) - по сравнению с другими возможными направлениями и одновременно определим более детальные задачи, связанные с выявлением смысла контекста и интерпретации получаемых выводов. Пусть, например, структура АМКЛ сходна с ДНФ - в целом модель (точнее, соответствующая формула) является импликацией, левая часть формулы является дизъюнкцией некоторого числа конъюнкций элементарных формул (интервалов (α, β)). Каждая конъюнкция здесь соответствует некоторой области K определения входных переменных X , для этой области существует ее отображение - соответствующая область выходных переменных Y . Возвращаясь к [2] отметим, что для каждой K становится теперь известны ограничения на величину потерь и конечная емкость (число конъюнкций) - условия, гаран-

тирующие успешное решение задачи восстановления регрессии. Улучшаются также условия для минимизации риска в условиях малой выборки – становится известной структура функции, т.е. отдельные конъюнкции, соответствующие отдельным областям определения K , среди которых можно выбрать одну, доставляющую наименьшую оценку риску. Улучшаются возможности для селекции выборки – отбрасывания строк, соответствующих некоторым K .

Подобным же образом улучшается решение задач распознавания образов методами параметрической статистики и таксономии. Отдельные образы или гипотезы (импликации, соответствующие конъюнкциям) генерируются объективно (алгоритмом построения АМКЛ), а роль разработчика здесь сводится лишь к указанию правила разбиения (или совершается некоторым стандартным способом). Вышеуказанные преимущества АМКЛ, как некоторого "фильтра" перед решением задачи регрессии, сохраняются и в случае методов главных компонент и факторного анализа [4-7], где рассчитываются в итоге опять уравнения регрессии, но уже по новым переменным – главным компонентам или факторам.

Полезным свойством АМКЛ является отбор "существенных" переменных, что облегчает задачу интерпретации модели – сопоставления ее с иными, например, литературными данными. Этого свойства нет явным образом в регрессионных методах как таковых, а отбор "существенных" переменных с помощью статистических критериев сильно зависит от принятой формы модели. Нет также возможности произвести явным (алгоритмическим) образом селекцию выборки (как и в методе экстремальной группировки параметров [8] и в методе группового учета аргументов [9]).

В АМКЛ непосредственно задается множество "невозмущенных" (целевых) состояний исследуемой системы. Ее переменные могут быть как вещественными числами, так и иметь логическую природу,

т.е. в конечном итоге отобразаться в виде множеств $\{0,1\}$ или множества $\{0,1, \dots, k\}$ (k - значная логика), все это значительно облегчает и делает удобными для интерпретации результаты вычислений, нежели чем, например, в методе пробных функций [10]. Для метода возмущений [12] требуется заранее иметь функциональную зависимость Y от X , в то время как АМКЛ отображает одновременно и процесс декомпозиции и агрегирования и процесс создания функциональной (логической) связи.

В отношении метода стохастического программирования [14] здесь можно сделать то же замечание, что и о регрессионном методе. Заметим лишь, что система ограничений в стохастическом программировании носит внешний (нормативный) характер, а не функциональный, как в АМКЛ (наборы интервалов (α, β) для X и соответствующих интервалов для Y). Функциональность этих интервалов имеет также рекурсивный характер - после получения необходимых результатов вычисления могут быть повторены, в результате чего новые интервалы будут меньше прежних, т.е. ограничения на величину потерь будут более жесткими.

АМКЛ в общем смысле является некоторой функцией от выбранных значений (т.е. статистикой), причем эта статистика безразлична к виду распределения исходных величин, подобно ранговым или знаковым статистикам [11-15]. Более того, подсчитывая число ситуаций (строк из X), попавших в K , можно определить это распределение. Именно эта особенность АМКЛ делает их удобными для построения адаптивных алгоритмов. Незнание хотя бы только класса принадлежности плотности распределения помех к какой-либо определенной плотности делает адаптивные алгоритмы нестабильными и чрезмерно чувствительными к виду помех [16-18]. Полагая, что множества, соответствующие АМКЛ, аппроксимируются рядами функций Эрмита и последние применяются для решения задач

анализа и синтеза многомерных систем управления, можно сказать, что АМКЛ могут отображать достаточно сложные законы управления. Сложность их будет определяться здесь числом членов в каждом ряде Эрмита и числом этих рядов в кусочно-линейном (по функциям Эрмита) законе управления. В связи с этим заметим, что в известном геометрическом подходе [21], (идеи которого подобны идеям, на основании которых предложен метод АМКЛ, однако, на языке линейной алгебры) разработаны методы анализа и синтеза лишь линейных многомерных систем управления.

Области K в общем случае могут пересекаться, однако для АМКЛ всегда можно задать такие интервалы (α, β) определения входных переменных, при которых K не будут пересекаться, а пересекавшиеся ранее области становятся областями с большей размерностью (число соответствующих переменных здесь равно объединению переменных пересекавшихся областей). Другими словами, в этом случае попадание в области K становятся попарно несовместными событиями, для которых как и ранее легко рассчитываются вероятности попадания в K и соответствующие формулы Байеса. В связи с этим заметим, что использование непараметрических критериев Колмогорова и Мизеса-Смирнова для реализации оптимальных правил решения в условиях априорной неопределенности [24] приводит к хорошим результатам лишь тогда, когда заданная структура правил решения хорошо аппроксимирует байсовы правила.

Для линейных систем управления иногда агрегирование влечет потерю различных характеристик состояния в пределах одного элемента агрегата [29]. Для АМКЛ отдельные элементы (из K) отличаются контекстом. Упрощается процесс имитационного моделирования систем [30-32] - дисперсия случайных величин (по каждой K) уменьшается, вследствие чего уменьшается количество вычислительной работы для достижения заданной точности

имитационной модели.

В данном подразделе рассмотрены лишь методы, с помощью которых на практике решаются проблемы управления сложными системами и показаны некоторые положительные особенности АМКЛ по сравнению с традиционными методами. Некоторые отдельные проблемы моделирования сложных систем, связанных с общей целью исследования (возможности выявления смысла, контекста и интерпретации) и их обсуждение, были приведены в литературном обзоре.

Напомним, как это указывалось выше, что под АМКЛ здесь понималась формула, построенная методами [48] и по своей структуре сходная с ДНФ. Другими словами, здесь обсуждается лишь направление, связанное с методами конструктивной логики при довольно общем и слабом ограничении (сходство структуры моделей с ДНФ). Детальное выявление (точнее, конструирование) структуры АМКЛ будет приведено далее. При этом необходимо будет решить следующие главные задачи. Прежде всего следует найти те алгебраические процедуры, с помощью которых истинность выводов на данном информационном массиве имела бы тот интуитивный смысл, который всегда подразумевается при исследовании объектов в условиях неопределенности — при некотором малом возмущении объекта выводы не должны изменяться. Далее следует найти процедуры с помощью которых при необходимости всегда бы выявлялась индивидуальная особенность (контекст) отдельного состояния сложной системы. Контекст полученных выводов, очевидно, имел бы большее значение в тех случаях, когда при использовании накопленных знаний (выводов) обнаруживалась бы ограниченность (противоречивость) этих выводов при их применении, например, для управления системы, находящейся в условиях информационной неопределенности. Наконец, последняя задача — поиск

алгебраических процедур, облегчающих в итоге интерпретацию полученных выводов, т.е. облегчающих их сопоставление с данными (например, литературными) данными. В основном эта задача сводится, как это отмечалось ранее, к получению (опознанию) достаточно простых, содержащих малое число переменных, выводов (образов).

1.5. Выводы к главе I

1. Цель работы заключается в разработке и исследовании алгебраических моделей конструктивной логики (АМКЛ) для управления и оптимизации КТС.

2. Актуальность работы состоит в том, что с помощью АМКЛ возможно получение достаточно простых и удобных для интерпретации выводов. Это позволяет привлекать для объяснения поведения КТС априорные (например, теоретические) данные и установить границы применимости последних, что уменьшает информационную неопределенность КТС.

3. Новизна работы (с точки зрения использования ее для управления и оптимизации КТС в условиях информационной неопределенности) заключается в привлечении новых методов — конструктивного исчисления предикатов, алгебраических моделей конструктивной логики, особого рода поряцковой топологии относительно режимов, на которых выполняется цель исследования.

4. Аналитический обзор литературных источников позволил "опознать" во множестве различных теорий, имеющих отношение к цели работы, теорию алгебраических моделей конструктивной логики (АМКЛ), которая использовалась до сих пор лишь в области исследования логики. Эта теория совместна с некоторым множеством предложенных семантических соплашений, достаточно полно формализует условия информационной неопределенности КТС и способ

получения выводов (для управления ХТС).

5. Преимущества АМКЛ по сравнению с другими (традиционными) моделями, отображающими поведение ХТС, заключаются:

а) в выявлении системной структуры на множестве входных и выходных данных, что уменьшает различные вычислительные трудности;

б) в построении выводов (непротиворечивых формул), на основании сравнения режимов, где выполняется цель исследования со всеми иными режимами, расположенными в ближайшей временной окрестности от первых (целевых) режимов. Этот способ позволяет избежать включения в выводы сравнительно медленно изменяющихся и часто нерегистрируемых переменных (инвариантность выводов относительно этих переменных).

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКТИВНОЙ ЛОГИКИ И ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1. Конструктивная логика и семантика исследуемых объектов

Пусть логико-математический язык Ω , необходимый для построения алгебраических моделей, содержит атомарные формулы φ (пропозициональные переменные и предикатные символы), из которых строятся сложные формулы с помощью логических связок $\wedge$ (конъюнкция), $\vee$ (дизъюнкция), $\supset$ (импликация), константы $\perp$ ("ложь") и кванторов $\forall$ ("для всех"), $\exists$ ("существует"). Знаки $\leq$, $\Rightarrow$, $\Leftrightarrow$ будут заменять словесные обороты: "есть по определению", "если ..., то ...", "тогда и только тогда" соответственно. Условимся также, что отрицание $\neg \varphi$ есть по определению $\varphi \supset \perp$.

Язык может содержать конечное множество видов $i = \overline{1, n}$ переменных x_i , пробегающих некоторую область объектов a данного вида, например, вхождение числовых значений для x в формулу φ . Вхождения называются связанными, если x лежит в области действия кванторов $\forall$ или $\exists$, за которыми сразу следует x , если же вхождение a не является связанными, то его называют свободным; переменные, входящие в формулу свободно, называются ее параметрами. Формула является предложением, если не содержит параметров. Формула, всем параметрам которой приписаны объекты соответствующих областей, называется оцененной формулой.

Для того, чтобы задать эффективную процедуру, позволяющую выяснить, задает ли какое-либо предложение истинное или ложное высказывание, введем некоторые общие принципы (семантические соглашения), которым должно удовлетворять понимание (интерпретация) разработчиком соответствующих формул языка. С конструктивной точки зрения каждая формула сама по себе представляет лишь

33

неполное сообщение о некотором уже выполненном построении. Формула φ считается истинной, если предъявлено построение или конструкция K , которая является полным и конкретным подтверждением φ , например, указан объект a для x , выполнено построение, связанное с оцененной формулой $\varphi(a)$.

Другой пример, если $\varphi = (\varphi_1 \wedge \varphi_2)$, то K подтверждает φ тогда и только тогда, когда K задает упорядоченный набор, состоящий из K_1 и K_2 — конструкций, подтверждающих φ_1 и φ_2 соответственно. Иными словами, при конструктивном подходе должны приниматься во внимание возможности субъекта, реализующего данные формулы — исследователя или вычислительной машины.

Если язык снабжен такой семантикой, то про некоторые предложения этого языка можно утверждать, что они ложны (истинны и отрицания), а некоторые являются неустановленными к настоящему времени. При дальнейшем исследовании эти предложения могут стать истинными или ложными.

В конструктивном исчислении предикатов Гейтинга НРС по сравнению с классическим исчислением предикатов не включается закон снятия двойного отрицания $\neg\neg\varphi \supset \varphi$ поскольку именно этот закон вызывает сомнения с точки зрения приведенной выше семантики. Здесь важный итог конструктивной логики предикатов сводится к следующим результатам (запись $\text{НРС} \vdash \varphi$ читается "из НРС выводима φ ").

- 1) Пусть p — атомарная формула. Тогда формулы $p \vee \neg p$ и $\neg\neg p \supset p$ не выводимы в НРС.
- 2) Если в $\text{НРС} \vdash \varphi \vee \psi$, то в $\text{НРС} \vdash \varphi$ или $\vdash \psi$.
- 3) Если в $\text{НРС} \vdash \exists x \varphi(x)$, то найдется терм t такой, что в $\text{НРС} \vdash \varphi(t)$. Здесь t — некоторая комбинация переменных, констант и функциональных символов — логических связок и кванторов.

В последующих подразделах будет показано, как на основании

этих выводов строится некоторая конструкция (алгоритм), позволяющая из множества исходных данных, характеризующих технологический процесс, получать выводы, в которых нет закона исключенного третьего $p \vee \neg p$, где наблюдается дизъюнктивность выводов — предварительно доказываемся либо φ либо ψ и где из множества исходных переменных, констант и функциональных символов подбираются такие термы t (или в содержательном смысле — такие области существования режимов технологических систем), при реализации которых выполняются поставленные задачи (свойство экзистенциальности НРС).

Примем очередное семантическое соглашение — массиву исходных данных, соответствующих исследуемой системе и некоторой промежуточной формуле φ в проводимых вычислениях соответствует формула

$$T \wedge \varphi_1 \wedge \dots \wedge \varphi_n \supset \psi_1 \vee \dots \vee \psi_m \vee \perp, \quad (2.1)$$

где $T = (\perp \supset \perp)$ — "стандартная истина", которую будем интерпретировать, как некоторую формулу, соответствующую неизвестным (нерегистрируемым) переменным; φ , ψ — атомарные формулы; связки $\wedge$ ("и") будут означать, что φ некоторым образом взаимодействуют между собой. Из левой части формулы (2.1.) может быть получена формула ψ_1 или ψ_2 и т.д., или $\perp$ (ложная) формула. Для краткости (2.1.) будем записывать как секвенцию вида $\Gamma \rightarrow \Delta$ ("из Γ следует Δ "), где Γ и Δ — наборы формул для левой и правой части формулы (2.1), соответственно.

Исчисление предикатов в стиле Генцена допускает следующее правило вывода, важное в дальнейших построениях и называемое сечением, т.е. отбрасыванием "несущественных" переменных в исследуемом далее частном случае:
$$\frac{\Gamma \rightarrow \Delta \varphi ; \varphi \Pi \rightarrow \Phi}{\Gamma \Pi \rightarrow \Delta \Pi} \quad (2.2)$$

Примем, что это правило вывода будет иметь следующую семантику. Секвенция $\Gamma \rightarrow \Delta \varphi$ означает, что после сопоставления целевой строки

со строкой сравнения Γ получается (через "или") набор атомарных формул Δ или φ . Далее происходит сосоставление результата со следующей строкой сравнения $\varphi\Pi$, которая, в частности, может содержать φ . Общий вывод (после горизонтальной черты в (2.2) — сопоставление с Γ и Π дает наборы (через "или") или Φ , т.е. из этих наборов исчезла φ , которая будет интерпретироваться как отбрасывание (при сопоставлении с определенной фиксированной целевой строкой) некоторой переменной x_i . Эти операции могут продолжаться далее — при наличии некоторого множества строк сравнения подобным же образом будут отбрасываться и другие "несущественные" переменные. В дальнейшем при разработке алгоритма построения АМКЛ это отбрасывание продолжается вплоть до последней переменной, которая запоминается и используется в дальнейшем для построения некоторой сложной формулы φ' .

Отметим, что правило сечения (2.2) (основная теорема Генцена) будет положено в основу алгоритма построения АМКЛ, конструирующего весьма естественную конечную систему редукций выводов (уменьшение логической сложности выводов).

2.2. Основные принципы построения алгебраических моделей конструктивной логики

2.2.1. Упорядоченное множество входных данных как псевдобулева алгебра

Назовем логической матрицей структуру (алгебру) вида

$$M = \langle B, B_0, \wedge, \vee, \supset, \perp \rangle,$$

где B — множество истинностных значений матрицы M , т.е. список, перечисляющий, какие именно элементы $a, b, c \in B$ (целые или вещественные числа, термы, качественные оценки и т.п.) истинны или ложны. Далее, $B_0 \subseteq B$ множество выделенных (целевых) значений. Разрабатываемые далее модели описывают поведение системы на

множестве его целевых состояний B , относительно всех иных состояний (т.е. модель описывает некоторое целевое поведение системы).

Упорядочим $a, b, c \in B, \langle B, \leq \rangle$. Двухместные операции на B , $\wedge$, $\vee$, $\supset$ и элемент $\perp \in B$ определим теперь более точно с помощью следующих условий:

- 1) $a \leq a$, 2) $a \leq b \wedge b \leq c \Rightarrow a \leq c$, 3) $a \wedge b \leq a$, $a \wedge b \leq b$,
- 4) $c \leq a$, $c \leq b \Rightarrow c \leq a \wedge b$, 5) $a \leq a \vee b$, $b \leq a \vee b$,
- 6) $a \leq c$, $b \leq c \Rightarrow a \vee b \leq c$, 7) $a \wedge (a \supset b) \leq b$,
- 8) $c \wedge a \leq b \Rightarrow c \leq (a \supset b)$, 9) $\perp \leq a$.

Согласно 3) и 4) конъюнкция $\wedge$ является точной нижней гранью, которая на числовой прямой лежит между наименьшим элементом конъюнкции и ближайшим к нему слева "чужим" элементом или, в частности, может совпадать с ним. В разрабатываемом далее алгоритме эта грань α выбирается так, чтобы она совпадала с этим ближайшим "чужим" элементом. Аналогичное замечание можно сделать относительно дизъюнкции $\vee$ — точной верхней грани β , которая, в частности, может проходить по ближайшему справа "чужому" элементу.

В случае выполнения условий (1-9) множество $\langle B, \leq \rangle$ называется псевдобулевой алгеброй (п.б.а.). Если еще выполняется условие 10) $a \vee (a \supset \perp) = T$, где T — наибольший элемент, $a \leq T$ и где $a \supset \perp = \neg a$, то в этом частном случае п.б.а. будет называться булевой алгеброй. Можно также сказать, что $\langle B, \leq \rangle$ будет булевой алгеброй тогда, когда дизъюнкция между каким-либо элементом a и $\neg a$ совпадает с наибольшим элементом T (т.е. в случае булевой алгебры на числовой прямой правее T "чужих" элементов нет).

2.2.2. Формирование вынуждающих условий

Алгебра $(B, \leq)$ соответствует упорядочению значений каждого i -го переменного x_i . Теперь упорядочим строки массивов исходных данных X и Y относительно целевых значений какого-либо

переменного, например, времени t .

Приводимые далее в тексте различные индексы будут отделяться запятыми, причем, обозначения индексов могут быть сложными, например, j_0 , j_c (номера целевых строк j_0 или номера строк сравнения j_c , соответственно), $j_0, j_c \in j$, $j_0 \cap j_c = \emptyset$, $j_0 \cup j_c = j$.

Будем полагать, что строки массивов исходных данных X и Y соответствуют левой части формулы (2.1), т.е. элементы x_{ij} (и также y_{kj}) соединены логической связкой "и" и образуют строку из логической матрицы M . Упорядочение $\langle M, \leq \rangle$ производится следующим образом. Просматриваем столбец t_j и фиксируем первый в этом списке целевой индекс $j_0 \in j$ и время t_{j_0} , которому соответствует строка M_{j_0} . Далее будем находить разности $t_{j_{c,1}} - t_{j_0} = \delta t_{j_{c,1}}$, $t_{j_{c,2}} - t_{j_0} = \delta t_{j_{c,2}}$ и т.д., где $j_{c,1}$, $j_{c,2}$ — индексы (номера) строк сравнения. Упорядочим $|\delta t_{j_c}|$ и, соответственно, $\langle M, \leq \rangle$ относительно первой выбранной целевой строки X_{j_0} .

Применяя (2.2), сопоставим каждому $X_{j_0} \in M$ множество $[x_{i,j_0}]_\alpha = \{x_{i,j_c} \in M \mid x_{i,j_c} \leq x_{i,j_0}\}$ — острый конус, порожденный $x_{i,j_0} \in X_{j_0}$. Аналогичным образом определяется $[x_{i,j_0}]_\beta = \{x_{i,j_c} \in M \mid x_{i,j_c} > x_{i,j_0}\}$. Эти множества определяются для всех целевых X_{j_0} . Семейства $[x_{i,j_0}]$ задают порядковую топологию T на M . Назовем п.б.а. всех открытых подмножеств этого топологического пространства алгеброй Крипке $CK(M, \leq)$, а саму структуру $\langle M, \leq \rangle$ — шкалой Крипке, т.е. системой упорядочений ^{расположений} таблиц M , где каждое упорядочение повторяется столько раз, сколько целевых строк $M_{j_0} \in M$.

Пусть на $\langle M, \leq \rangle$ существует некоторая функция $\mathcal{D}$, с помощью которой вычисляется $[x_{i,j_0}]_\alpha$ и $[x_{i,j_0}]_\beta$, по которым определяются границы $\alpha_i, \beta_i \in Q_i$, определяющие интервал (α_i, β_i) , относительно фиксированного X_{j_0} , $\alpha_i < x_{i,j_0} < \beta_i$; если $x_{i,j_0} \in (\alpha_i, \beta_i)$, то

$y_{\alpha, j_0} \in (\delta_{\alpha}, \delta'_{\alpha})$, где δ_{α} , δ'_{α} — соответствующие границы для y_{α, j_0} . Обозначим через PM множество всех подмножеств M , через α_i открытое множество, состоящее из элементов $y_{\alpha, j_0} \in (\alpha_i, \beta_i]$. Аналогично шкале Крипке $\langle M, \leq \rangle$ определим шкалу Бета-Крипке $\langle M, \leq, Q \rangle$, где элементы $M_{j_0} \subset M$ будем называть далее вынуждающими условиями (относительно M_{j_0}). Отношение $\leq$ будем называть отношением информативности, так если $\alpha_{i, j_2} \leq \alpha_{i, j_1}$ будем говорить, что α_{i, j_2} информативнее α_{i, j_1} (интервал α_{i, j_2} может быть меньше только под влиянием дополнительной информации, что будет видно из описания конкретного алгоритма). Q есть функция, определенная на M — весь дальнейший алгоритм собственно и предназначен для определения Q , т.е. границ α , β . Интервалы $\alpha_{i, j}$ будем называть моментами, а про соотношение $\alpha_2 \leq \alpha_1$ будем говорить, что момент α_2 позднее (информативнее) момента α_1 . П.б.а. соответствующую шкале $\langle M, \leq, Q \rangle$ называют алгеброй Бета-Крипке $BK(M, \leq, Q)$.

Именно с помощью этой алгебры с определенной семантикой, которая определяется величинами "относительного времени" δt , описанными выше, удастся формализовать интуитивные (и, конечно, опытные) соображения, по которым в условиях неполной информации при изучении достаточно сложных объектов большое значение имеет так называемый "контрольный опыт", который по своим условиям — во времени, пространстве и т.д. находится в наибольшей близости от "целевого опыта", когда выполняется цель исследования. Однако "контрольный опыт" конструируется таким образом, что он не влечет выполнения поставленной цели. Сопоставление "целевого опыта" и "контроля" позволяет отсеять несущественные переменные. В представленной выше формализации удастся сделать больше в этом направлении. Так, например, могут отсеяться лишь некоторые значения какой-либо переменной x_i , а оставшиеся значения "объясняют" сам факт выполнения цели на максимальном множестве строк сравнения — при реализации этих значений (точнее содержащих их

интервалов) цель выполняется, а при реализации всех иных значений — не выполняется.

Однако, нет оснований считать, что массив M полностью сам по себе определяет ценность (информативность) этих интервалов, определяемую, например, по числу значений x_i , попавших в интервал, или по числу строк сравнения, использованных для построения этого интервала. Более правильно было бы решение использовать для таких оценок новые (экзаменационные) массивы M , на которых бы выявилось, сохраняется ли истинность полученных выводов в будущем. Однако, в условиях наиболее часто встречающегося дефицита информации приходится заведомо так организовать вычисления, чтобы истинность выводов сохранялась бы максимальным образом и в будущем. С этой точки зрения алгебра Бета-Крипке представляет большие возможности — при сравнении наиболее близких целевых и "контрольных" строк уже автоматически обеспечен "локальный" вывод, который в наибольшей степени зависит именно от зарегистрированных и изменяющихся переменных из M (а не от некоторых неизвестных возмущений).

Если же в качестве "контроля" выбирать строки сравнения, наиболее удаленные по времени от целевой строки, то при такой организации вычислений всегда есть вероятность, что полученные (непротиворечивые в M) выводы зависят не только от зарегистрированных $x_i \in M$, но и от неизвестных возмущений, например, медленного дрейфа существенных, но нерегистрируемых переменных — старение катализатора, механизмов, изменения качества реагентов и т.п. возмущений, которые обычны для достаточно сложного объекта исследования. В том же случае, когда "контроль" максимально приближен к "целевому опыту", подобные переменные мало изменяются и поэтому даже при их регистрации не вошли бы в выводы. Таким образом, упорядочение строк сравнения по "относительному времени"

δ^t делает выводы более объективными (не так сильно связанными со случайными изменениями $x_i \in M$).

Отсутствие упорядочения строк сравнения (например, для упрощения алгоритма), по-видимому, приемлемо лишь для исследования сравнительно простых (детерминированных) объектов, слабо зависящих от окружающей среды. Формальная непротиворечивость выводов в обоих случаях не должна успокаивать разработчиков моделей. Поскольку не всегда заведомо ясно, насколько прост объект, то лучше всегда использовать упорядочение строк сравнения по "относительным временам" δ^t , жертвуя при этом (по сравнению с алгоритмами перебора) даже обычными оценками моделей — минимальностью числа символов в модели, числом значений (элементов) x_{j_0} в интервалах и т.п.

2.2.3. Определение алгебраической модели конструктивной логики (АМКЛ)

Алгебраическую модель конструктивной логики для используемого далее логико-математического языка Ω , описывающего сложные (и, в частности, химико-технологические системы), определим набором $A = \langle B, D, R, \widehat{Cnst}, \widehat{Fn}, \widehat{Pr} \rangle$. Здесь B — полная п.б.а. Бета-Крипке, называемая здесь алгеброй истинностных значений модели,

D — функция, вычисляющая некоторые множества D_i — множества предметных объектов (значений x_{i,j_0} для соответствующих целевых строк). R есть функция, вычисляющая интервалы $[\min x_i, \max x_i] \in B$ или, другими словами, области определения объектов $x_i \in D$ для соответствующих формул (импликаций). Заметим, что в нашем случае существенную роль будут играть модели с непостоянной предметной областью. Функция $\widehat{Cnst}$ определяет константы $\alpha_i, \beta_i \in D$ языка Ω . Напомним, что α_i, β_i являются элементами D , но принадлежат к иному классу эквивалентности для U , нежели x_{i,j_0} .

Функция $\widehat{Fn}$ приписывает значение функциональным символам языка Ω .

Остановимся здесь подробнее на некоторых важных определениях.

Ранее отмечалось, что открытый острый конус $[x_{i,j_0}]$ задает порядковую топологию T . Для краткости обозначим элементы x_{i,j_0} из этого конуса символами $u, v \in T, v \leq u$ (" v выбираются позже u "). Для каждого i и точки $u \in M$ определяется множество $\mathcal{U}(i, u) \in \mathcal{D}$ (область предметных объектов, известных к моменту u). Объекты, с помощью которых будут конструироваться импликации φ будем обозначать через $q \in \mathcal{U}(i, u), q_i \in \mathcal{D}_i$. Зададим функцию F ("алгоритм вычисления единственных значений q "), сопоставляющую каждому функциональному символу f и моменту u некоторое частичное отображение $\bar{f}_u = \bar{F}(f, u)$. Область определения $\bar{f}$ включена во множество $\mathcal{U}(i_1, u) \times \dots \times \mathcal{U}(i_n, u)$, а область значений включена в $\mathcal{U}(i, u)$, (т.е. для некоторого единственного вида i элемента u). При этом на $\bar{f}_u$ накладываются следующие условия:

а) если $v \leq u$ и определено значение $\bar{f}(u, q_1, \dots, q_n)$ (более раннее значение единственного q_i), то определено и значение $\bar{f}(v, q_1, \dots, q_n)$, (поскольку заведомо известен более поздний и более информационный момент v). Кроме того, $\bar{f}(u, q_1, \dots, q_n) = \bar{f}(v, q_1, \dots, q_n)$ (должен вычисляться один и тот же единственный q_i);

б) если $u \in M, S \in Q(u), q_i \in \mathcal{U}(i_1, u), \dots, q_n \in \mathcal{U}(i_n, u)$, то существует $v \in S$ такое, что определено $\bar{f}(v, q_1, \dots, q_n)$, (т.е. задано правило выбора единственного q_i).

После этих условий определим $\hat{F}_n(f_1, q_1, \dots, q_n, q) =$
 $= \{u \in M / (\forall S \in Q(u)) (\exists v \in S) (\bar{f}(v, q_1, \dots, q_n) = q)\}.$

Другими словами, $\hat{F}_n$ — это функция, вычисляющая те "предшествующие" элементы острого конуса $u, v \leq u$, за которыми следуют элементы v . При их сопоставлении со строкой сравнения в момент v выдается сигнал: "отбрасывается по формуле 2.2. последняя переменная, соответствующая объекту q ". После этого происходит возврат к моменту u и запоминается q , т.е. значение

элемента x_{i_1, j_0} , который будет первым элементом сложной гипотезы (конъюнкции) K . Если эта гипотеза образует импликацию φ , истинную на M , то происходит переход к следующим целевым строкам j_0 . Если же φ ложна на некоторых строках сравнения j_0 , то для той же строки j_0 аналогичным образом происходит выделение x_{i_2, j_0} , x_{i_3, j_0} и т.д. Эти элементы соединяются между собой логической связкой "и", образовавшиеся конъюнкции K_{j_0} соединяются связкой "или" и вся сложная формула соединяется связкой "если, то" с y_{j_0} . Можно сказать, что функция $\hat{P}_r$ в итоге приписывает значение этим функциональным символам языка Ω , т.е. вычисляется, какие именно переменные (по ходу вычислений) какими символами должны быть соединены.

Для задания $\hat{P}_r$ сначала определяют открытое множество предикатных символов типа "для всех x_{i, j_0} , $i = i_1, \dots, i_r$, $j_0 = j_0^1, \dots, j_0^g$, где r — число переменных, вошедших в частичную формулу φ (для заданной j_0) и где g — число рабочих строк, значения переменных для которых попадают в соответствующие множества $\{x_{i, j_0}\}$, значения y соответствуют классу эквивалентности y_{j_0} ". После этого задается полное множество $\hat{P}_r$ следующим способом. Будем говорить, что D есть оператор типа пополнения на некоторой п.б.а. $\langle M, \leq \rangle$, если для всех $a, b \in M$ выполняются условия: 1) $a \leq Da$, 2) $a \leq b \Rightarrow Da \leq Db$, 3) $DDa = Da$. Элемент a назовем полным, если $a = Da$. Множество всех полных элементов M обозначим через $C(M)$. В этом случае потребуем еще выполнения условия 4) $a \leq Db \Rightarrow a \leq D(a \wedge b)$, если $a \in C(M)$, $b \in M$. Таким образом, полные элементы (интервалы) Da или Db как бы размазаны по числовой оси до своих ближайших соседей. В итоге $\hat{P}_r \in B$ определяется как множество интервалов (α_i, β_i) , соответствующих каждой частичной импликации $\varphi|j_0$.

Итак, АМКЛ определяется конструктивно, не только как

некоторое множество символов переменных, констант, а также функциональных и предикатных символов, но и как некоторый алгоритм – совокупность операций и правил $\exists, \forall, R, \widehat{const}, \widehat{F_n}, \widehat{P_n}$, определенных выше.

2.3. Условия управляемости и устойчивости систем, отображающих АМКП

2.3.1. Управляемость

В общей теории систем [53] последняя определяется как некоторое собственное подмножество декартова произведения $S: M \times U \rightarrow Y$, где $M \times U = X$ – вход и Y – выход системы и где M – внешние возмущения и U – управляющие сигналы. Кроме S' задается критерий качества системы $G: M \times U \times Y \rightarrow V$. В том случае, если вместо Y используется его расчетное значение $S'(m, u)$, $(m, u) \in M, U$, вычисляется расчетный критерий качества $g(m, u) = G(m, u, S'(m, u))$. В качестве V можно задать, например, усредненный критерий Фишера (усредненный по этапам построения модели), который равен отношению дисперсии $y_{k,j}$ относительно общей средней $\bar{y}_k$ к дисперсии $y_{k,j}$ относительно $y_{k,j} = f(X)$, рассчитываемого по модели. В качестве $\bar{y}_{k,j}$ для АМКП, соответствующей K_j можно выбрать, например, условное среднее $y_{k,j} | K_j$. Соответственно выбираемым формулам K_j , отображающих подсистемы S_j , производится усреднение и критерия Фишера. В дальнейшем будет указан метод аппроксимации множеств, соответствующих K_j , рядами Эрмита, в этом случае $y_{k,j}$ соответствует сумме ряда Эрмита. Множество $V' \subset V$ назовем достижимым относительно заданного g , когда $(\forall v)[v \in V' \Rightarrow (\exists(m, u))(g(m, u) = v)]$, т.е., когда существует такое внешнее возмущение и управление, что расчетное значение критерия g (табличное значение с заранее заданным уровнем значимости) равно или меньше критерия v , рассчитываемого с помощью табличного

значения выхода y_{k,j_0} .

Множество $V' \subset V$ назовем вполне управляемым относительно g тогда и только тогда, когда $(\forall u)(\forall v)[v \in V' \wedge u \in U \Rightarrow (\exists m)(g(m, u) \leq v)]$, т.е. в частности, когда внешнее возмущение такое, что $g \leq v$. Заметим, что если V' вполне управляемо, то оно достижимо относительно заданного g , однако обратное утверждение неверно — достижимость критерия g еще не означает вполне управляемости. Для этого нужно, согласно приведенному выше определению, существование лишь определенного (не всякого) вида внешних возмущений. Заметим еще, что роль именно такого определенного вида возмущений играет контекст АМКЛ.

Каждому столбцу y_k будет соответствовать v_k ; в этом случае соответствующую систему будем называть многокритериальной, $v_k \in V$. Как и раньше, множество $V' \subset V$ будет достижимым, дополнительно также будет считать, что $V' = v_1 \times \dots \times v_n$. Множество V' назовем несклеенным, тогда и только тогда, когда V' достижимо. Соответственно, система будет называться склеивающей, если не все требуемые компоненты $v_k \in V'$ можно реализовать одновременно, т.е. между различными v_k в этом случае существует функциональная зависимость. Существование этой зависимости является достаточным условием неуправляемости S , т.е. системы, определяемой упорядоченным набором элементов $M, U \in X, M \times U \rightarrow Y$, соответствующего ранее определенной логической матрице M , на основе которой строится АМКЛ. Срыв управляемости может быть, таким образом, описан в терминах склеенности многокритериальной системы.

2.3.2. Устойчивость

Весьма просто и естественно определяется общее понятие устойчивости АМКЛ, соответствующей системе S , $s \in S$, где s — подсистемы, соответствующие отдельным импликациям K_{j_0} . Пусть $S(x_{i,j_0}) = y_{k,j_0}$, интервалы $(\alpha_i, \beta_i) \in (\alpha, \beta)$, $(\gamma_k, \delta_k) \in (\gamma, \delta)$

для X и Y , соответственно, назовем здесь системой окрестностей относительно целевой строки j_0 (исходя из которой они и были получены). Тогда пару x_{i,j_0}, y_{i,j_0} назовем устойчивой относительно (α, β) , (γ, δ) в том и только в том случае, когда

$$(\forall (\gamma_k, \delta_k) \in (\gamma, \delta)_{j_0}) (\exists (\alpha, \beta)_{j_0}) (\forall x_{i,j_0} (x_{i,j_0} \in (\alpha, \beta) \rightarrow S(x_{i,j_0}) \in (\gamma_k, \delta_k)).$$

Другими словами, значения некоторых x и y устойчивы, когда найдутся другие значения x и y , имеющие одни и те же интервалы (окрестности) (α, β) и (γ, δ) , соответственно. Это условие позволяет отбирать более устойчивые (чаще встречающиеся) интервалы. Символом Γ_j будем далее обозначать множество $\Gamma_j = \{j_0 \mid K_j\}$, а с помощью выражения $|\Gamma_j|$ — мощность этого множества, т.е. число точек j_0 , включенных в область K_j .

Вышеприведенное условие отображает общесистемный подход к понятию устойчивости. Аналогичным образом в [53] вводится понятие функции типа функции Ляпунова для общей динамической системы и формулируются необходимые и достаточные условия устойчивости в терминах этих функций при наличии модели в аналитической форме, соответствующей АМКЛ. В данной работе мы ограничимся исследованием лишь АМКЛ.

2.4. Определение общих динамических систем, отображаемых АМКЛ

До сих пор динамика не обсуждалась. Однако, из описания АМКЛ ясно, что выводы (φ) получаемые из этих моделей связаны со временем t . Использование окрестностей δt времени около t , соответствующего целевой строке, имело смысл частичного преодоления условий информационной неопределенности. Остановимся теперь подробнее на тех временных характеристиках, которые непосредственно связаны с проблемами управления сложными системами S .

Каждая импликация, соответствующая целевой строке j_0

является в общем случае функцией времени, $\varphi_{j_0}(t)$. Итоговая АМКЛ конструируется, как дизъюнкция конъюнкций K_{j_0} , соответствующих $\varphi_{j_0}(t)$, причем отбрасываются те K_{j_0} , которые покрывают те же строки j_0 , что и K_{j_0} с большими оценками $|\Gamma_{j_0}|$ (K_{j_0} последовательно выбираются из их упорядоченного списка $(K_{j_0}, \leq)$ в порядке уменьшения $|\Gamma_{j_0}|$). Условимся, что если разные j_0 дают одни и те же интервалы (α, β) , т.е. в итоге одни и те же K_{j_0} , но с разными индексами j_0 , то K_{j_0} , входящему в АМКЛ будет приписываться индекс j_0 , ближайший к среднему значению номеров $j_0 | K_{j_0}$. После этого запишем АМКЛ в виде упорядоченного списка (дизъюнкции), $(K_t, \leq)$, приписывая каждому j_0 соответствующее t ,

$$K_{t1} V \dots V K_{tm} \supset y_{t1} V \dots V y_{tm}.$$

Т.о., АМКЛ отображает изменение поведения S во времени.

При достаточно быстром расчете АМКЛ практически реализуется дуальное управление [54]. После накопления в памяти некоторого основного множества $\{K\}$ для управления выбирается та конъюнкция K , для которой выполняется цель управления и контекст которой (или переменные $x_i \in K$) соответствует существующим в момент управления возмущающим воздействиям; далее управление производится по выбранному K . При отсутствии возможности реализации требуемой K , осуществляется дежурный режим управления, в простейшем случае это может быть или управление по последнему (текущему) управлению K , или подбор K по "ограниченному" контексту, когда подбирается интервал (α, β) лишь по одному или нескольким наиболее важным возмущающим воздействиям, или, наконец, задается среднее (глобальное) по исходным данным значение переменных управления u . Во время дежурного управления накапливаются новые данные и рассчитывается новая K (или вообще новая АМКЛ), по которой и производится дальнейшее

управление. При достаточно быстром использовании текущей информации K с целью оптимизации V (для оптимизации управления) происходит процесс изменения параметров (α, β) и структуры (АМКП) системы S , т.е. осуществляется адаптивное оптимальное управление объектом (ХТС). Отметим здесь еще, что цель Z управления $\mathcal{U}$ принимает в общем случае значение k - значной логики. В частности, эти значения могут быть булевыми (см. алгоритм построения АМКП).

При несколько больших затратах вычислительного времени дежурный режим может быть уточнен следующим образом. Если возмущения $M' \subset M \subset X$ в момент управления выходят за интервалы $(\alpha, \beta)_\Lambda$, соответствующие K или контексту, то формируется входной массив $X \setminus M'$, все строки которого (состояния объекта) соответствуют выполнению цели управления $(\mathcal{U} \subset X, M \cup \mathcal{U} = X)$. Затем формируется массив $U := M$ и вычисляется АМКП в виде наборов формул $\mathcal{U} \wedge (X \setminus M') \supset M'$ для целевого класса эквивалентностей M'_Π . Таким образом, вычисляются управления $\mathcal{U}$, соответствующие возмущениям M'_Π , приближающихся к значениям M'_t в момент управления ("метод моделирования внешних возмущений с помощью АМКП").

Отметим, что вышеприведенные схемы использования АМКП для управления объектом практически реализуют (в интервальном виде) весьма перспективную универсальную адаптивную (самонастраивающуюся) систему управления с идентификатором в цепи обратной связи (АСИ [20]).

В том случае, когда время не является лимитирующим фактором, например, при исследовании устоявшегося технологического процесса, АМКП может быть применена в схеме эволюционного планирования [55] экспериментов на промышленном объекте. В этом

случае конъюнкции $K_t = u_{i_1} \wedge \dots \wedge u_{i_r}$ используются, чтобы не просто случайным образом выставить значение u_i управляющей переменной из интервала (α_i, β_i) , но и использовать границы α_i, β_i для построения матрицы планирования полного или дробного факторного эксперимента, где уровню 0 в матрице будет, например, соответствовать значение α_i , а уровню I – значение β_i . Далее используется весь стандартный аппарат методов планирования экстремальных экспериментов [4] с целью поиска оптимального управления.

В этих же условиях можно непосредственно использовать АМКП для постепенного продвижения к оптимуму критерия V . Для этого следует подать выход с АМКП не только на управление, но и одновременно на вход вновь строящегося АМКП2, X2 XI, т.е. при рекурсивном использовании АМКП, когда (α_i, β_i) из АМКП используются для формирования X2 – нового набора исходных данных, которое используется для построения АМКП2 и т.д. В геометрическом смысле этот вид управления (с оптимизацией V) можно представить следующим образом. Исходная АМКП для целевых U , есть пространство XI, состоящее из (частично пересекающихся) ячеек (параллелепипедов) K с ребрами $(\alpha_i, \beta_i) | K_i$, частично заполняющих XI и соответствующего пространства U , частично заполненного ячейками $(\gamma_k, \delta_k) | K_i$. При построении глобальных АМКП ячейки для X и U полностью заполняют эти пространства (для этого потребуем лишь, чтобы границы α_i и β_i были бы единичными, как для U^0 , так и для U^I). АМКП2 есть более мелкие ячейки, включенные внутрь исходных, и т.д. Остановка этого процесса измельчения ячеек происходит при оптимальном значении критерия качества V . В идеальном случае итоговая АМКП есть набор некоторых малых ячеек в X и U, соответствующих различным режимам,

зависящих от существования внешних возмущений М. Численность множества этих ячеек тем будет больше, чем сложнее исследуемый процесс. Назовем вышеописанный способ управления с постепенным уточнением режимов функционирования объекта эволюционным управлением.

Отметим возможность отображения АМКП, как системы S с переменной структурой управления [19] - динамической системы, поведение которой на случайных интервалах времени характеризуется различными структурами K и описывается различными уравнениями.

Напомним, что кроме вышеперечисленных аспектов включения "крупномасштабных" временных зависимостей в АМКП, в эти модели время может включаться (в K) как непосредственно ($X_0 = t$), (α_0, β_0), так и в виде некоторых заранее заданных функций от X , например, когда время дискретное $X_{n+1}(t) = X_1(t) - X_1(t-1) = \Delta X_1(t)$ (или вводятся центральные разности первого порядка). Аналогичным образом могут быть введены разности второго порядка и т.д. При непрерывном времени могут быть рассчитаны (и введены в массив X) соответствующие производные $\partial x / \partial t$, $\partial^2 x / \partial t^2$ и т.п. В целевой вектор y_0 могут также быть включены значения $X(t-1)$, $X(t-2)$ и т.д. Все эти значения (разности, предшествующие значения и т.п.) могут также быть рассчитаны и для каждого из (и включены в массив X). В том случае, если в K включаются интервалы (α, β), для которых соответствующие переменные имеют индексы $j_0 - \delta t$, $\delta t = 1, \dots, m$, будем говорить (для дискретного t), что данная подсистема $S_t = K_t$ имеет глубину памяти, равную δt .

Для построения АМКП требуется учитывать время запаздывания по всем переменным (если это запаздывание существует). В этом случае точкой начала отсчета можно, например, выбрать время регистрации наиболее "позднего" Y_k ; время t_{j_0} назовем исходным

собственным временем строки j^0 ; после учета запаздывания собственное время у всех переменных X, Y должно быть одинаковым.

Включение переменных $\Delta X, \Delta Y, X(t-1), Y(t-1)$ и т.д. в АМКП позволяет детализировать понятие собственного времени объекта и выявляет его информационную природу — для построения модели (интервалов (α, β) оказывается более важным не одинаковое абсолютного время регистрации X_i, Y_k , а то время t_{j^0} , при котором АМКП имеет наиболее простой вид, когда из модели нельзя удалить ни одной K и ни одной переменной из K без того, чтобы АМКП продолжала бы оставаться всегда истинной логической формулой (соответствующей тупиковой дизъюнктивной нормальной форме в булевой алгебре [37]). Возможен и другой, например, энтропийный критерий определения t_{j^0} (назовем его итоговым собственным временем), которое вычисляется по минимуму информационной энтропии при переходе от набора X, Y к АМКП. Таким образом, роль исходного t_{j^0} оказывается лишь удобной точкой отсчета времени. На вход алгоритма могут подаваться не только строки j^0 , но и некоторые строки из окрестности j^0 (все определяется лишь требуемой скоростью вычислений), в итоге K может содержать переменные вида $X_{i1}(t), X_{i2}(t-1), X_{i3}(t+1)$ и т.п. Более того, с самого начала можно было бы задать на входе алгоритма построения АМКП некоторый вариационный механизм и отбор АМКП по энтропийному признаку, который бы без введения понятия собственного времени вычислял итоговую модель. Однако этот путь в настоящее время нереален из-за слишком большого количества вычислений.

После всех вышеприведенных качественных разъяснений о характере поведения АМКП как динамической системы, дадим соответствующее формальное определение, согласующее АМКП (рассматрива-

емые как системы S) с общей теорией систем [53].

Уточним временную индексацию $x \in X$ (или $y \in Y$) следующим образом. Пусть $t \in T$, $t' > t$, $T_t = \{t' : t' \geq t\}$, $T^t = \{t' : t' < t\}$, $T_{tt'} = \{t'' : t \leq t'' < t'\}$. Соответственно $x_t = x|_{T_t}$, $x^t = x|_{T^t}$, $x_{tt'} = x|_{T_{tt'}}$. Введем операцию сочленения элементов, положив $\hat{x}(\tau) = x(\tau)$, если $\tau \leq t$ и $\hat{x}(\tau) = x^*(\tau)$, если $\tau > t$ и условившись обозначать $\hat{x}$ через $\hat{x} = x^t \cdot x_t^*$ (операция сочленения элементов x^t и x_t^*). Другими словами, ранее введенная операция поиска элементов во временной окрестности j_0 (δt изменяется от 1 до m для дискретных t) как раз и отражает факт сжатия интервалов (α, β) за счет сочленения элементов (α, β) из строк сравнения. Эти элементы объединяются как бы в единую новую переменную $\hat{x}$, которая выбирается в окрестности $t = t_{j_0}$, где значение самой окрестности $\tau = \delta t$ колеблется по знаку ($\tau < t$, $\tau > t$) и растет по абсолютной величине. Эта переменная $\hat{x}$ постепенно ограничивает (с ростом τ) интервал (α, β) до тех пор, пока не будет получена всегда истинная формула (импликация) K .

Пусть заданы АМКЛ, соответствующая система $S \subset X \times Y$ и некоторое множество $C = \{\alpha, \beta\}$, которое будет являться (по определению) пространством состояний системы S тогда и только тогда, когда найдутся два таких семейства функций

$$\bar{p} = \{p_t : C \times X_t \rightarrow Y_t\} \quad \text{и} \quad \bar{\varphi} = \{\varphi_{tt'} : C \times X_{tt'} \rightarrow C\}, \quad \text{что}$$

$$1) \text{ для всех } t \in T, \quad S_t \subset S_t^p \text{ и } S_t^p = \{(x, y) : (\exists c)(y = p_t(c, x))\} = S$$

$$\text{для всех } t, t' \text{ и } t'' \in T,$$

$$2) \quad p_t(c, x_t)|_{T_{t'}} = p_{t'}(\varphi_{tt'}(c, x_{tt'}), x_{t'}),$$

$$3) \quad \varphi_{tt'}(c, x_{tt'}) = \varphi_{t't''}(\varphi_{tt''}(c, x_{tt''}), x_{t''t'}),$$

$$4) \quad \varphi_{tt}(c, x_{tt}) = c,$$

где $x_t = x_{tt'} \cdot x_{t'}$ и $x_{tt'} = x_{tt''} \cdot x_{t''} \cdot x_{t'}$. В этом случае АМКЛ назовем динамической системой S в пространстве состояний C .

В данном случае ρ_t - это некоторая функция, соответствующая K (вычисляющая Y), а $\bar{\rho}$ - семейство таких функций, соответствующих АМКП. Соответственно определяются функции перехода состояний $\bar{\varphi}$.

Условие I отображает начало использования модели АМКП - процесс обучения должен идти до тех пор, пока не найдется такое пространство состояний $C = \{\alpha, \beta\}$, которое могло бы быть использовано для начала управления, $t=0$, объектом. Другими словами, структура системы S всегда ограничена "генетически" той информацией, на основе которой она была создана и условие I задает признак, когда такое обучение можно кончать (когда системой уже можно начать управлять). Символом $S_t^{\bar{\rho}}$ здесь обозначается набор всевозможных допустимых состояний управляемой системы.

Назовем динамическую систему в пространстве состояний полной тогда и только тогда, когда для всех $t \in T$ выполняется равенство $S_t = S_t^{\bar{\rho}}$. Заметим, что реальная система S лишь до какого-то определенного времени может считаться полной, т.е. иметь в памяти запас конъюнкций K , соответствующих наблюдаемым состояниям объекта управления.

Условие 2 отмечает переход от обучения к использованию функции (модели) ρ_t вне интервала времени, на котором она была получена. В этом случае, если нет готовой начальной (уже находящейся в списке $K \in \text{АМКП}$) функции $\rho_0 = \rho_t$ происходит процесс "доучивания" (т.е. адаптации к новым допустимым состояниям исследуемого объекта). Пусть $t \leq t' \leq t'' \leq \dots$ и т.д., вначале функция ρ_t определялась на множестве сочлennых (непрерывно следующих друг за другом по мере расширения окрестности δt) элементов $x_t = x_{tt'} \cdot x_{t'}$. Теперь же это множество расширяется, $x_{tt'} = x_{tt''} \cdot x_{t''} \cdot x_{t'}$. С помощью этого множества элементов сравнения $x_{i,j}$, старые интервалы c суживаются и функция пере-

хода (в алгоритме построения АМКЛ она выступает как некоторая последовательность операций) строит новый интервал $\varphi_{tt'}(c, x_{tt'}) = c_{t'} = (\alpha, \beta)_{t'}$, который и используется для управления. Таким образом, само понятие динамической системы для АМКЛ включает в себя возможность адаптации к новым состояниям исследуемого объекта.

Условие 3 обеспечивает возможность использования условия 2 в более широкой (открытой) окрестности нежели замкнутый интервал $[t, t']$, т.е. в неограниченной окрестности δt (в том смысле, как это было описано при формировании вынуждающих условий АМКЛ). Напомним, что $x_{tt'} = x_{tt''} \cdot x_{t''} \cdot x_{t'}$, где элементы $x_{t''}$ и $x_{t'}$ неограничены справа.

В условиях весьма малой окрестности δt (в идеальном случае – при отсутствии новых строк сравнения) интервала (α, β) остаются старыми (условие 4).

Заметим, что вышеприведенное определение общей динамической системы, отображаемой АМКЛ, позволяет совершить переход к более детализированным понятиям минимальной реализации, линейности, предопределенности, стационарности и других понятий, образующих единую математическую формализованную (вводимую на аксиоматической основе) структуру, с помощью которой строится общая теория систем [53].

2.5. Аппроксимация АМКЛ рядами Эрмита и метод эрмитовых моделей

Часто на практике требуется аппроксимировать подмножества K , соответствующие АМКЛ, с целью получения, например, переменной структуры управления в аналитическом виде. Ряды Эрмита удобны в данном случае тем, что с их помощью можно вводить обобщенные функции [41], т.е. задавать требуемую степень глад-

кости ряда эрмитовой модели ЭМ. Затем (и это главное) ряд быстро убывает при $x = \pm \infty$. Можно задать условия аппроксимирования точек из K таким образом, чтобы функция (ряд) проходила бы, например, также и через α , β . Расчетное значение $y_{k,n}$ принимается равным среднему значению $\tilde{y}_k$ по всему столбцу $y_k \in Y$ как для $x \in (\alpha, \beta)$ так и для значений $x \in X$ вне интервала (α, β) . В этом случае аппроксимация каждой K дает на графике (где по ординате отложен $y_k | K_t$, а за ось x принят $x = \tilde{y}_k$) некоторую кривую ("волну"); если же любой из $x_i \in K$ выходит за пределы (α, β) , то эта кривая стремится к $y_k | K_t = \tilde{y}_k = \text{const}$. Другая причина удобства рядов Эрмита — простота их преобразования Фурье — ряд остается старым, лишь нечетные его члены умножаются на мнимое i .

Поскольку заранее (из АМКП) известно, что информация о поведении системы распределена среди некоторого конечного множества конъюнкций $K \in \text{АМКП}$, необходимо подобрать кусочно линейную (по функциям Эрмита h_n) функцию таким образом, чтобы по возможности все K вошли бы в ЭМ, но при этом следует отдавать предпочтение тем K , которые имеют большие оценки $| \Gamma_t |$ (ввиду устойчивости этих K). Для этого обращаемся к АМКП, составленной из списка K , упорядоченного по их оценкам ($| \Gamma_{j_0} |, \leq$). В этих условиях, очевидно, аппроксимация должна проводиться вначале по первому полиному Эрмита по всем K_{j_0} в порядке убывания $| \Gamma_{j_0} |$, вычисляя каждый раз критерий V (например, пусть это будет критерий Фишера). В случае достижения заранее заданного уровня ϑ текущим (по ходу выборки очередного K_{j_0}) и усредненным по всем уже ранее вычисленным критериям V выбор очередного K_{j_0} прекращается и начинается аппроксимация ранее отобранных K_{j_0} таким же образом вторыми полиномами и т.д. вплоть до достижения максимума $\tilde{V}$. В том же

случае, если $\tilde{V}$ превышает заранее заданное табличное значение критерия g , аппроксимация также заканчивается.

При такого рода аппроксимации, очевидно, наибольшее значение придается первым членам рядов Эрмита (для каждого K_{j_0}). Напомним, что полиномы Эрмита выбираются по следующей системе:

$$H_0 = 1, H_1 = x, H_2 = x^2 - 1, H_3 = x^3 - 3x, H_4 = x^4 - 6x^2 + 3, \dots, \\ H_n = (-1)^n e^{x^2/2} (e^{-x^2/2})^{(n)} \quad [41].$$

Воспользуемся (для ускорения сходимости рядов) следующей нормировкой переменных $x_i | K_{j_0}$, в основе которой лежит свойство функции $y = x \exp[-\frac{1}{4}x^2]$ принимать максимальное значение при $x = \sqrt{2}$:

$$x_{i,n} = \sqrt{2} (x_i - \inf x_i) : (x'_i - \inf x_i),$$

где $x_{i,n}$ — нормированное значение для x_i , $\inf x_i = (\min x_i + d_i) : 2$ при условии $x_i \in K_{j_0}$, $x'_i = \tilde{x}_i | (y_k > \tilde{y}_k | K_{j_0})$,

$x'_i = \tilde{x}_i | (y_k \leq \tilde{y}_k | K_{j_0})$ и где $\sim$ — символ операции усреднения. Для расчета x'_i согласно этим формулам отбирается множество точек, лежащих выше условного среднего $\tilde{y}_k | K_{j_0}$ (для описания больших значений y_k), для этих точек затем усредняются их абсциссы. Аналогичным образом вычисляется x'_i , когда строится ЭМ для малых значений y_k . Если ЭМ состоит из первых членов ряда (хотя бы для некоторых K_{j_0}) и $x_n = \sqrt{2}$, y_k имеет экстремальное значение для соответствующих K_{j_0} .

Далее вычисляются функции Эрмита (постоянные множители не записываются): $h_n = \exp[-\frac{1}{4}(x_{i,n}^2 + \dots + x_{r,n}^2)] H_{1n} \dots H_{rn}$ (H_{in} для разных $x_{i,n}$ перемножаются). Затем вычисляются коэффициенты c_n : $c_n = \sum_{j_0} h_n (y_k - \tilde{y}_k) : \sum_{j_0} h_n^2$, вычисляются по строкам $j_0 | K_{j_0}$, причем в расчеты включаются еще две точки, $\inf x_i$ и $\sup x_i = (\max x_i + \beta_i) : 2$, для которых принимаем $y_k = \tilde{y}_k$. Для области K_{j_0} ЭМ будет иметь вид:

$y_{k,n} = \tilde{y}_k + \sum_{n=1}^{\mathcal{N}} c_n h_n$, если $X \in K_{j_0}$, где $\mathcal{N}$ – число членов ряда. Аналогичной по форме будет модель для следующей области $K_{j_0} = K_2$ (пусть будет K_1 – первая область определения переменных x_i), однако условия ее применимости будут следующими: если $X \in K_2$ и $X \notin K_1 \cap K_2$ и т.д. После исчерпывания необходимых K_{j_0} (согласно $\tilde{V}$), модель завершается фрагментом: $y_{km} = \tilde{y}_k$, если $X \notin K_1 \cup K_2 \dots \cup K_{m'}$, где m' – число отобранных K_{j_0} по критерию $\tilde{V}$. При использовании критерия Фишера условимся использовать дополнительные степени свободы, соответствующие точкам $\inf x_i$ и $\sup x_i$ (по всем K_{j_0} эти степени свободы суммируются). Однако, общее число степеней свободы ЭМ не должно превышать $m-1$, где m – число строк в массиве X .

2.6. Выводы к главе 2

1. Предложены процедуры (семантические соглашения), позволяющие выяснить, задает ли исходная информация, рассматриваемая как предложение некоторого логико-математического языка Ω , истинные или ложные высказывания. Другими словами, формулам из Ω здесь приписывается определенного рода понимание (интерпретация), как отображение поведения некоторых объектов (ХТС), находящихся в условиях информационной неопределенности. Польза такого рода формализма заключается в "экономии" математических средств – использовании уже известного, детально разработанного и богатого в выразительном отношении языка Ω (алгебраических моделей конструктивной логики).

2. Задана определенного рода порядковая топология на множестве информационных ситуаций (строк массива входных данных), где не выполняется заданная цель, относительно тех ситуаций, где такая цель выполняется. Именно такого рода топология является тем средством (множеством "вынуждающих" условий), с помощью

которого конструируются выводы, имеющие требуемый смысл, полезный в условиях информационной неопределенности – инвариантность этих выводов относительно некоторого множества медленно изменяющихся переменных.

3. ХТС управляема с помощью АМКП, если существует такая область определения внешних возмущений, при которой критерий качества системы больше априорного (табличного) критерия качества.

4. АМКП устойчива, если существует такая область определения входных переменных X , что расчетное (модельное) значение выходной переменной y_k , полученное при подстановке в модель всякого нового значения x , попадает в область значений Y_k (под новым значением x здесь понимается то значение, которое было получено уже после формирования АМКП).

5. Дано определение общих динамических систем, отображаемых АМКП.

6. Предложены методы управления, оптимизации и адаптации ХТС с помощью АМКП.

7. Предложен метод аппроксимации АМКП рядами Эрмита, что позволяет строить аналитические модели ХТС в условиях информационной неопределенности, причем эти модели сохраняют все полезные свойства АМКП. С другой стороны, аналитический аппарат позволяет использовать многие весьма важные методы, по традиции применяемые в теории управления. В частности, ряды Эрмита дают возможность весьма простого перехода в спектральную область.

ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ АМКЛ

3.1. Описание этапов построения АМКЛ

Исходными данными для алгоритма являются вещественные (с конечным числом знаков), целочисленные, k -значные или булевы массивы входных X_{ij} и выходных $Y_{\omega j}$ данных, где $k = 0, 1, 2, \dots$, $i = 1, \dots, n$ (число входных переменных), $j = 1, \dots, m$ (число строк массивов), $\omega = 1, \dots, \ell$ (число выходных переменных). Исходной является также строка целевых значений $Y_{\omega 0}^c = (Y_{10}^c, \dots, Y_{\ell 0}^c)$, где $c = \{0, 1\}$ и, соответственно, $Y_{\omega 0}^c$ принимает значения 0 или 1, которые интерпретируются как выражения "меньше или равно $Y_{\omega 0}$ " или "больше $Y_{\omega 0}$ ", соответственно; $Y_{\omega 0}$ — вещественное значение некоторой точки разбиения, которая до ее точного определения нижеследующим алгоритмом интерпретируется как медиана всех m значений $Y_{\omega j}$ (всего существует ℓ медиан).

Цель алгоритма заключается в вычислении тупиковых дизъюнктивных нормальных форм (ТДНФ) относительно интервалов (α_i, β_i) для некоторых переменных x_i . Каждая точка этих интервалов, т.е. класс эквивалентности, соответствует булеву значению 1, а все иные точки — значению 0. Цель достигается после выполнения перечисленных ниже этапов алгоритма:

1) сформировать цикл "для $\omega = 1, \dots, \ell$ выполнить следующие операции":

2) вычислить средние $\tilde{Y}_{\omega}$ по m значениям $Y_{\omega j}$;

3) присвоить для булевы значения 0, 1 по правилу, если $Y_{\omega j} \leq \tilde{Y}_{\omega}$, то $Y_{\omega j}^c$, иначе $Y_{\omega j}^c = 1$;

4) присвоить для Z_j^c булевы значения по правилу: если строка $Y_{\omega j}^c = Y_{\omega 0}^c$, то $Z_j^c = 1$, иначе $Z_j^c = 0$;

- 5) вычислить $\sum_{j=1}^m z_j^0$ и $\sum_{j=1}^m z_j^1$;
- 6) если $|\sum_{j=1}^m z_j^0 - \sum_{j=1}^m z_j^1| : (\sum_{j=1}^m z_j^0 + \sum_{j=1}^m z_j^1) \leq 0,05$, то записать z_j^2 , иначе упорядочить y_{ω_j} по их значениям, $(y_{\omega_j}, \leq)$;
- 7) если $\sum_{j=1}^m y_{\omega_j}^0 \geq \sum_{j=1}^m y_{\omega_j}^1$, то присвоить точке разбиения y_{ω_0} значение ближайшего к $\tilde{y}_{\omega}$ (или к ранее найденной y_{ω_0}) элемента $y_{\omega_j} < \tilde{y}_{\omega}$ (или $y_{\omega_j} < y_{\omega_0}$), иначе присвоить значение ближайшего к $\tilde{y}_{\omega}$ (или к ранее найденной y_{ω_0}) элемента $y_{\omega_j} > \tilde{y}_{\omega}$ (или $y_{\omega_j} > y_{\omega_0}$) и перейти к этапу 3 ;
- 8) ограничить число обращений к этапу 3 значением $m/3$;
- 9) записать последнее значение столбца z_j^2 , закончить цикл, соответствующий этапу I'' ;
- 10) если $z_j^2 = 1$, то значение j строки X_j присвоить символам (индексу) j^0 ("целевые строки"), иначе - символам j^c ("строки сравнения") ;
- 11) если $X_{j^0} = X_{j^c}$ записать "неотделимость строк j^0 и j^c " ;
- 12) сформировать цикл "для $j^0 \in j = 1, \dots, m$ выполнить следующие операции" ;
- 13) сформировать цикл "для $j^c \in j = 1, \dots, m$ вычислить $d_{j^c} = |j^c - j^0|$;
- 14) упорядочить d_{j^c} , $(d_{j^c}, \leq)$;
- 15) упорядочить j^c , соответствующие d_{j^c} , $(j^c, \leq)$;
- 16) сформировать цикл "для $j^c \in \{j^c, \leq\} = 1, \dots, m$ выполнить следующие операции" ;
- 17) сформировать цикл "для $i = 1, \dots, n$ вычислить следующие операции" ;
- 18) если $x_{i,j^c} < x_{i,j^0}$, то $d_{i,j^c} = x_{i,j^c}$, иначе
- 19) если $x_{i,j^c} = x_{i,j^0}$, то перейти к этапу 17 ;
- 20) если для всех i $x_{i,j^c} = x_{i,j^0}$, то $j^0 := j^0 + 1$ и перейти к этапу II ;
- 21) если новое значение $d_{i,j^c+j} > d_{i,j^c}$, то записать

$\alpha_{i,jc+j}$, где $j=1, \dots, m$ - количество обращений к этапу I6, иначе записать $\alpha_{i,jc}$;

22) если новое значение $\beta_{i,jc+j} < \beta_{i,jc}$, то записать $\beta_{i,jc+j}$, иначе записать $\beta_{i,jc}$;

23) вычислить число столбцов n' , для которых получены границы α или β или α и β ;

24) если $n'=1$ и список упорядоченных j^c пуст, то записать $(\alpha_{ir,jc}, \beta_{ir,jc})$, где $r=1, 2, \dots$ - ранг (число переменных) строящейся в цикле I6 конъюнкции K_{j^0} интервалов

$$(\alpha_{i1}, \beta_{i1}) \wedge (\alpha_{i2}, \beta_{i2}) \wedge \dots \wedge (\alpha_{ir}, \beta_{ir}),$$

25) если $n'=0$, то записать интервал $(\alpha_{i,jc-1}, \beta_{i,jc-1})$ и перейти к этапу I6;

26) если список упорядоченных j^c пуст и $n' > 1$, то вычислить оценки γ_{i,j^0} , равные числу включений α_{i,j^0} в соответствующие интервалы $(\alpha_{ir,jc}, \beta_{ir,jc})$, где $j^0 \subset j=1, \dots, m$;

27) выбрать единственный интервал $(\alpha_{ir,jc}, \beta_{ir,jc})$, соответствующий $\max \gamma_{i,j^0}$ или, если имеется несколько оценок $\max \gamma_{i,j^0}$, то выбрать интервал, соответствующий наименьшему в $\{\max \gamma_{i,j^0}\}$;

28) для $j^c = 1, \dots, m$ проверить истинность импликации K_{j^0} :

$$K_{j^0} \supset Z_{j^c}^2 = 1,$$

29) если K_{j^0} ложна, то пометить строку $j^c, (j^c m)$;

30) восстановить строку j^0 , кроме $\alpha_{i,j^0} | K_{j^0}$;

31) задать $j^c \in (j^c, \leq)$;

32) перейти к этапу I7;

33) если список $j^c m$ пуст, то вычислить $\Gamma_{j^0} = \{j^0\}$, при условии $\alpha_{i,j^0} \in K_j$ и оценку $|\Gamma_{j^0}|$ (мощность для Γ_{j^0});

34) перейти к этапу I2;

35) упорядочить $|\Gamma_{j^0}|$, $(|\Gamma_{j^0}|, \leq)$;

36) выбрать K_{j^0} при условии, что j^0 соответствует упоря-

доченному списку ($|\Gamma_{j_0}|, \leq$);

37) выбирать последующие K_{j_0} при условии ($|\Gamma_{j_0}|, \leq$), если $\Gamma_{j_0+1} \subseteq \Gamma_{j_0}$, то перейти к выбору последующей K_{j_0+1} , иначе записать K_{j_0} , $j_0 < j = 1, \dots, m$;

38) записать АМКП в виде тупиковой дизъюнктивной нормальной формы $K_1 \vee K_2 \vee \dots \supset Z^c = 1$, записать соответствующие Γ и $|\Gamma|$;

39) инвертировать столбец Z^c и перейти к этапу 10, но в этапе 38 в этом случае записать АМКП в виде $K_1' \vee K_2' \vee \dots \supset Z^c = 0$;

40) конец алгоритма построения АМКП.

Комментарии к алгоритму могут быть следующими. Заметим, что при незначительном изменении этапов 2 - 6 функции цели Z_j^c могут быть приданы k -значные значения $c = 0, 1, 2, \dots, (k-1)$. Этот случай может быть полезен, например, при построении модели, области значения которой жестко заданы в виде некоторых регламентных значений, а значения меньшие или большие регламента нежелательны. В предельном случае $c = 0, \dots, (m-1)$. В этом случае алгоритм определит m импликаций - чем отличается каждая строка от множества всех остальных строк.

Этапы I - 9 формируют целевую функцию Z_j^c для многокритериальной системы. Естественно, что во многих практически важных случаях такая система может быть склеенной, т.е. в данном случае количество 0 и I может сильно различаться и, соответственно, количество информации, содержащейся в моделях, будет мало. В этих случаях, по-видимому, придется ограничиться оптимизацией системы лишь по некоторому ограниченному вектору Y или, быть может, даже порознь по каждому $u_\omega \in Y$.

Сообщение "неотделимость строк j_0 и j_c " (этап II) очень редко, но может встречаться, например, в булевых или k -значных массивах при малом n . Это сообщение (при исследовании сложных систем) обычно интерпретируется как недостаток числа

входных переменных (датчиков); модель, полученная в этих условиях, ложна на этих строках.

Ширина интервала $(\alpha_{i,jc}, \beta_{i,jc})$ по мере сравнения $x_{i,jc}$ с $\{j_c, \leq\}$ может только уменьшаться и в пределе может быть равна 0 (т.е. x отбрасывается на этапах 18 - 22).

Следует отметить этап 25 - необходимо держать в памяти значения α или β , полученные на предыдущем шаге, далее, согласно работы оператора цикла по этапу 16 происходит как бы "перескок" через строку, где вычеркиваются все переменные и процесс сравнения для X продолжается далее на упорядоченных строках j_c .

В более общем случае в этапах 13 - 15 столбец номеров j_0 может быть дополнен столбцом $X_0 = t$, выполняющим роль непрерывного времени.

Запись Γ_{j_0} позволяет в случае необходимости записать правую часть импликации $K_1 \vee K_2 \dots \supset Z^c$ (см. этап 39) в виде $K_1'' \vee K_2'' \vee \dots$ или более подробно (лишь для K_1 и K_1'')

$$(\alpha_{i_1} < x_{i_1} < \beta_{i_1}) \wedge \dots \wedge (\alpha_{i_r} < x_{i_r} < \beta_{i_r}) \vee \dots \supset (\gamma_{\omega_1} < y_{\omega_1} < \delta_{\omega_1}) \wedge \dots \wedge (\gamma_{\omega_\ell} < y_{\omega_\ell} < \delta_{\omega_\ell}) \vee \dots$$

где γ и δ - границы, соответствующие $\Gamma = \{j_0\}$, по которым вначале определяются $(\min y_\omega, \max y_\omega)$, а затем и (γ, δ) после нахождения ближайших соответствующих значений $y_{\omega,jc}$. Заметим еще, что число дизъюнктивных членов в правой части импликации будет в точности равно количеству таковых в левой части и ранг отдельных конъюнкций для всех K'' будет везде равен ℓ .

Аналогичным образом, запись Γ позволяет определить "контекст" АМКП - интервалы $(\min x, \max x)$ по всем переменным, не вошедшим в K_{j_0} (всего таких "контекстов" будет столько, сколько конъюнкций в АМКП (в левой части импликаций по этапу 39), для $Z=0$ и $Z=1$).

Как уже отмечалось, в более широком смысле будем понимать

под АМКП не только множество полученных ТДНФ, но также и сам алгоритм их получения, правила интерпретации термов ТДНФ (интервалов (α, β) , (γ, δ)), множества Γ , оценки $|\Gamma|$, контекст всех конъюнкций, составляющих ТДНФ, интервалы $(\min x_i, \max x_i) \mid K$, $(\min y_\omega, \max y_\omega) \mid K$ и также границы между $K \mid \mathbb{Z}$ и $K \mid \mathbb{N}$, $\inf x_i = (\min x_i + d_i) : 2$ и $\sup x_i = (\max x_i + \beta_i) : 2$.

Одним из полезных способов интерпретации АМКП является их "перевод" на язык эрмитовых моделей (ЭМ), что позволяет использовать разнообразные приемы математического анализа, выявляющие новые аспекты использования полученных результатов (построение ортогональных полиномиальных моделей, вычисление их ошибки, преобразование Фурье и т.д.).

3.2. Пример

Приведем простой пример построения АМКП для того, чтобы сам процесс вычислений был бы достаточно нагляден. Для задания подобного рода примеров весьма удобны таблицы случайных чисел, которые позволяют строить задачи произвольной сложности. Сложные примеры могут служить тренировочными задачами для отработки и проверки как программы, вычисляющей АМКП, так и возможностей (памяти, быстродействия) используемой ЭВМ.

Идеальный генератор случая (случайная таблица с очень большим числом столбцов и строк) должен давать достаточно сложную АМКП, где $r, s \rightarrow \infty$ (ранг конъюнкции и их число великов). Предельный случай будет, когда r равно числу столбцов, а $s = m$ — числу строк таблицы.

Пусть задана следующая таблица случайных чисел:

Таблица 3.1.

Исходные данные для построения АМКП

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_1	y_2	z
1	5	4	2	0	3	8	0	1	0
2	5	5	4	4	7	2	1	0	1
3	2	6	3	3	7	9	1	1	0
4	2	5	7	4	0	3	0	0	0
5	2	6	4	4	9	1	1	0	1
6	5	5	2	6	5	1	1	0	1
7	0	3	4	6	0	2	0	0	0

Пусть цель $y_{\omega_0}^z = (1, 0)$, т.е. требуется найти условия, при которых одновременно y_1 велико, а y_2 мало. Средние для y_1 и y_2 равны 4,4 и 3,7 соответственно, количество 0 и 1 в столбце z примерно одинаково, перенос точки разбиения не нужен.

Выбирается первая в списке ($j = 1, 2, \dots$) строка $j^0 = j \mid z = 1$, т.е. $j = 2$, сравнивается с ближайшей к $j = 2$ строкой $j = 3$, ($j^c = j \mid z = 0$). Итог записывается в виде строки интервалов, слева записывается номер j^c , т.е. $j^c \mid z = 0$, выбираемых в порядке удаления от $j = 2$; при одинаковом расстоянии выбирается сначала строка снизу:

$$3: 2 < x_1 \leq 5, 5 \leq x_2 < 6, 3 < x_3 \leq 4, 3 < x_4 \leq 4,$$

$$1: \emptyset, 4 < x_2 < 6, 3 < x_3 \leq 4, 3 < x_4 \leq 4,$$

x_1 выбыл - интервал пуст, т.к. в j^0 и j^c одинаковые числа, для x_2 интервал расширился до $\alpha_2 \in X_{j^c}$, для x_3 и x_4 интервалы остались те же - интервал может только суживаться, если уже найдены элементы α или β :

4: $\emptyset$, $\emptyset$, $3 < x_3 < 7$, $\emptyset$,
 остался лишь один интервал, который расширился до $\beta_3 \in X_{j_c}$,
 сравнения продолжаются;

7: $\emptyset$, $\emptyset$, $\emptyset$, $\emptyset$,
 делается шаг назад - возврат к предыдущему состоянию и запомина-
 ется итог - единственный интервал ($3 < x_3 < 7$), по всем прове-
 ряется гипотеза ($3 < x_3 < 7$) $\supset Z = I$, она ложна на
 $j_c = 7 = j_{cm}$. Восстанавливается $j_0 = 2$ (кроме x_3):

$$2: x_I = 5 , \quad x_2 = 5 , \quad 3 < x_3 < 7 , \quad x_4 = 4 ,$$

$$7: 0 < x_I \leq 5 , \quad 3 < x_2 \leq 5 , \quad - , \quad 4 \leq x_4 < 6 ,$$

больше строк j_c нет, подсчитывается число попаданий χ в
 конкурирующие интервалы элементов x_{i,j_0} : $\chi_1 = 3$, $\chi_2 = 2$,
 $\chi_4 = 2$, выбирается интервал $0 < x_I < 5$, больше помеченных
 строк j_{cm} нет, конструируется импликация K_2 :

$$(0 < x_I \leq 5) \wedge (3 < x_3 < 7) \supset (7 \leq y_I \leq 9) \wedge (I \leq y_2 \leq 2) ,$$

в данном случае интервалы для y_I и y_2 определяются по мно-
 жеству $\Gamma_2 = \{2, 5\} = j_0 | K_2$, соответственно оценка $|\Gamma_2| = 2$.

Аналогичным образом определяется импликация K_5 :

$$(3 \leq x_2 \leq 6) \quad (4 \leq x_3 < 7) \supset Z = I, \quad \Gamma_5 = \{2, 5\}$$

(для краткости связку $\wedge$ не будем писать), затем определяется
 последняя по списку импликация K_6 :

$$(2 < x_I \leq 5) \quad (4 < x_2 \leq 5) \supset Z = I, \quad \Gamma_6 = \{2, 6\} .$$

Поскольку все оценки одинаковы, импликации остаются в старом
 порядке, по общему правилу K_2 остается в списке, K_5 вычер-
 кивается, поскольку $\Gamma_2 = \Gamma_5$, остается в списке K_6 . Ограничим-
 ся случаем $Z = I$, тогда итоговая модель (тупиковая ДНФ) бу-
 дет иметь вид:

$$(0 < x_1 \leq 5) (3 < x_3 < 7) (2 < x_1 \leq 5) (4 < x_2 \leq 5) \Rightarrow \\ \Rightarrow (7 \leq y_1 \leq 9) (1 \leq y_2 \leq 2) (5 \leq y_1 \leq 7) (1 \leq y_2 \leq 2),$$

$$\Gamma_2 = \{2, 5\}; \quad \Gamma_6 = \{2, 6\}.$$

Таким образом, для того, чтобы указать средства для выявления цели $y_1 \geq 5$ и $y_2 \leq 2$ потребовалось 8 чисел вместо исходных $3 \cdot 4 = 12$ (полагая, что без конструирования модели пришлось бы просто запомнить ситуации $j^0 = 2, 5, 6$). Заметим, что в данном случае обрабатывалась случайная таблица, когда "сжатие" исходной информации мало. Далее будут указаны довольно интересные с технологической точки зрения примеры, когда моделирование приводит к значительному изменению информационной энтропии.

3.3. Пример для сравнения с комитетным методом

Приведем еще один простой пример, решенный комитетным методом распознавания образов [22]. Помимо тех сведений, которые приведены в литературном обзоре, напомним также, что комитетные конструкции применяются при решении задач математического программирования с противоречивой системой ограничений и с векторным критерием цели. Комитетные конструкции применяются также для моделирования сложных зависимостей [22].

Численные данные [22, с.176] для наглядности приведем в виде массивов M_1 и M_2 :

j	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
x_1	3	4	-7	-6	-5	-4	6	8	-5	-4	-2	0	-12	-10
x_2	11	11	-3	-4	10	9	8	9	6	5	0	0	-6	-6
y	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3

(массив M_1 для обучения);

j	1	2	3	4	5	6	7
x_1	-3	3	7	-5	-5	-11	-1
x_2	10	10	8	4	-3	-7	-1
y_a	2	1	2	2	1	3	1 или 3
y_k	1	1	2 или 3	2 или 3	1	2 или 3	отказ
y	2	1	2	2	1	3	3

(массив M_2 для распознавания).

В последнем массиве строка y_a отображает расчетное значение y , полученное с помощью АМКЛ, y_k - с помощью метода комитета и y - действительные значения цели. АМКЛ для M_1 имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 (-2 < x_1 < 6) \vee (10 < x_2 \leq 11) &\supset y = 1, & |\Gamma| &= 2, \\
 (-10 < x_1 < -5) \vee (-6 < x_2 < 0) &\supset y = 1, & |\Gamma| &= 2, \\
 (0 < x_2 < 11) &\supset y = 2, & |\Gamma| &= 6, \\
 (-4 < x_1 < 3) \vee (-3 < x_2 < 5) &\supset y = 3, & |\Gamma| &= 2, \\
 (-12 \leq x_1 < -7) \vee (-6 \leq x_2 < -4) &\supset y = 3, & |\Gamma| &= 2.
 \end{aligned}$$

Для удобства использования (для распознавания y) модель отображена в виде списка всех импликаций с их оценками.

В массиве M_2 приведены результаты распознавания y с помощью АМКЛ (y_a) и с помощью метода комитета (y_k). Последний метод правильно распознает лишь столбцы $j = 2$ и 5; неопределенный ответ ($y = 2$ или 3) дается в случае столбцов (ситуаций) $j = 3, 4, 6$; отказ от распознавания при $j = 7$ и ошибочный ответ при $j = 1$. АМКЛ правильно распознает все ситуации, кроме неопределенного ответа при $j = 7$ ($y = 1$ или 3).

3.4. Выводы к главе 3

1. В данной главе описан алгоритм построения единого числового критерия цели, что позволяет оптимизировать многокритериальные несклеенные системы.

2. Описан способ упорядочения исходных данных, что позволяет реализовать получение выводов, записанных в первую очередь от ближайших ситуаций (от рассматриваемой), когда множество медленно изменяющихся переменных еще мало изменилось.

3. Описан способ проверки и постепенного усложнения гипотез, что позволяет получать наиболее простые выводы.

4. Описан простой способ построения тупиковых ДНФ, полезный в условиях информационной неопределенности.

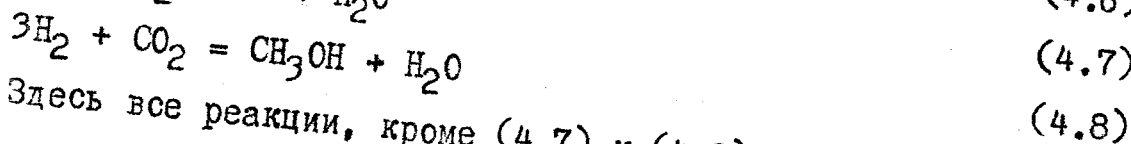
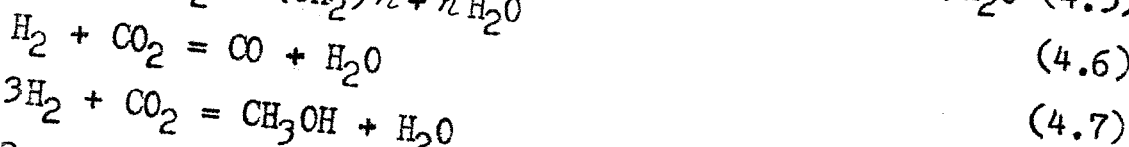
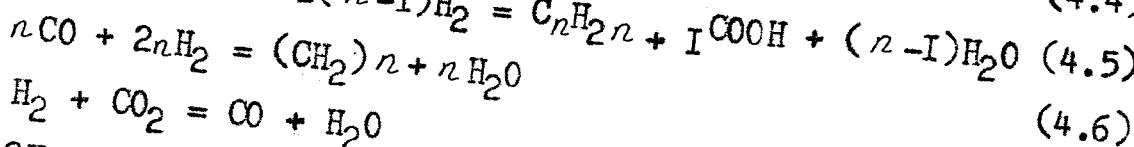
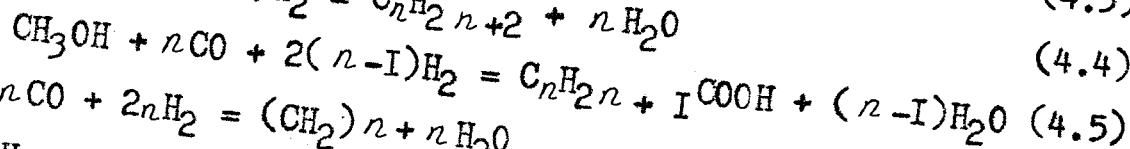
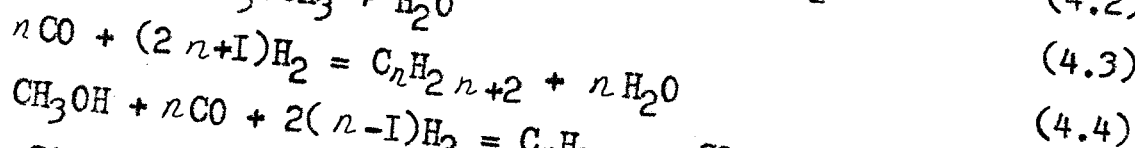
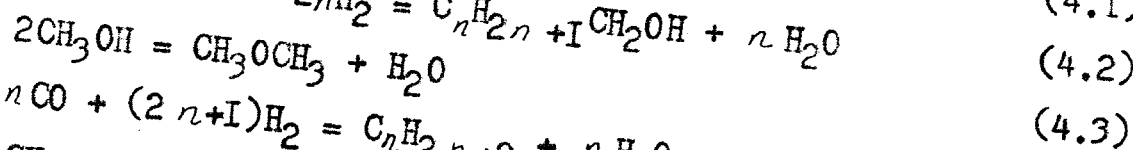
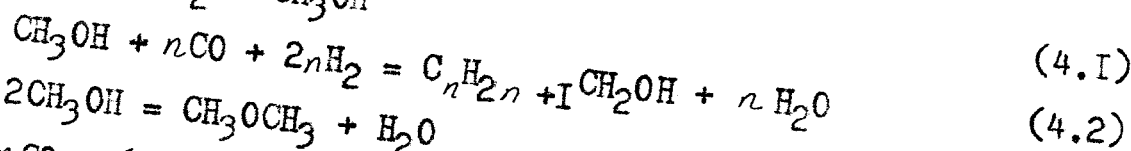
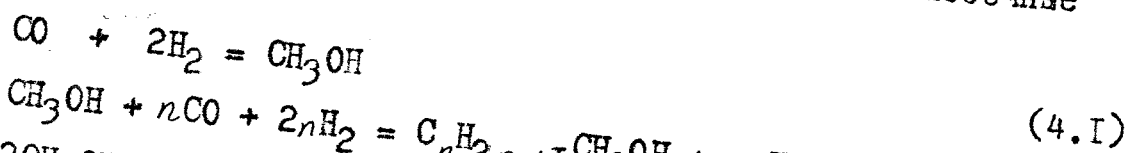
5. Дан способ вычисления "контекста" полученных выводов, что позволяет использовать этот контекст для объяснения поведения системы, когда обнаруживается противоречие между моделью и новыми данными.

6. На отдельном числовом примере выявлена большая эффективность метода АМКП по сравнению с методом комитета.

Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛ С ЦЕЛЬЮ УПРАВЛЕНИЯ, ОПТИМИЗАЦИИ ИЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ХТС

4.1. Выявление причин, влияющих на содержание воды в метаноле-сырце в промышленных условиях

Количество примесей и, прежде всего, воды в метаноле-сырце в значительной степени определяют экономику производства метанола. Выпишем основную реакцию синтеза метанола и побочные реакции, в результате которых образуется вода и другие побочные продукты [57]:



Здесь все реакции, кроме (4.7) и (4.8) экзотермичны. Известно, что вода в основном образуется в результате реакции (4.7).

В условиях нормальной эксплуатации были исследованы три реактора синтеза метанола [58], на вход которых поступал свежий газ с повышенным содержанием CO_2 ($\sim 4,4\%$) и, для сравнения, три реактора, которые работали на газе с содержанием CO_2 примерно $2,7\%$. Все типы реакторов были полочного типа с цинк-хромовым катализатором. Для первой группы реакторов было зарегистрировано 48, а для второй — 61 стационарных режимов. Поскольку основная цель данной работы заключалась в получении качественных выводов,

которые были необходимы для проектирования более экономичных способов производства метанола, сразу же было решено отобразить все значения переменных в виде двух классов эквивалентности – меньше или равно медиане и больше медианы (для каждого x_i и y). Смысл этой операции – облегчить интерпретацию модели с помощью таких операций сравнения как "больше" или "меньше" (при сопоставлении с текстами публикаций) и с помощью терминов "возрастает" или "убывает" (при сопоставлении с некоторыми формулами в этих публикациях, см.[58]).

В таблице 4.1 представлены обозначения и координаты медиан

Таблица 4.1.

Значения переменных и их медиан для 1 и 2 групп реакторов

Переменные	Медианы			
	:Обо- : :зна- : :чения:		I группа : (2 группа)	
	I	2	3	4
Пробег колонны, сутки	x_1	200	210	
Давление, $\text{kPa} \cdot 10^{-2}$	x_2	300	297	
Температура I полки, $^{\circ}\text{C}$	x_3	320	323	
"средняя", $^{\circ}\text{C}$	x_4	363	-	
"последней полки", $^{\circ}\text{C}$	x_5	383	384	
"максимальная", $^{\circ}\text{C}$	x_6	384	-	
Состав свежего газа, % по объему:				
CO_2	x_7	4,4	2,7	
CO	x_8	24,7	25,4	
H_2	x_9	68,2	69,0	
CH_4	x_{10}	2,3	-	
N_2	x_{11}	0,1	1,9	
H_2/CO	x_{12}	2,75	2,68	

I	:	2	:	3	:	4
Состав циркуляционного газа,						
% по объему						
CO ₂	x _{I3}	0,8		0,6		
CO	x _{I4}	7,0		7,0		
H ₂	x _{I5}	72,0		75,0		
CH ₄	x _{I6}	20,0		3,1		
N ₂	x _{I7}	20,0		12,1		
H ₂ /CO	x _{I8}	11,0		11,0		
Объемная скорость,						
тыс. норм. м ³ /час	x _{I9}	25,0		20,0		
Нагрузка по газу основного						
хода, тыс. норм. м ³ /ч	x ₂₀	85,0		-		
Нагрузка по свежему газу,						
тыс. норм. м ³ /ч	x ₂₁	12,5		-		
Нагрузка по продувочному						
газу, норм. м ³ /ч	x ₂₂	700		-		
Анализ метанола-сырца:						
эфирное число, отн.ед.	y ₁			0,19		
кислотное число,	y ₂			0,017		
альдегиды, %	y ₃			0,041		
непредельные, %	y ₄			0,010		
перманганатная проба, мин.	y ₅			2,4		
вода, %	y ₆	11,5		6,4		

Для удобства интерпретации запишем АМКП в виде списка конъюнкций, соответствующих простым импликантам [37] функции y_6 , перед K_j будем также записывать их оценки $|Γ_j|$ (см. табл.4.2.),

черта сверху символов x, y означает, что в K_j входит класс эквивалентности, все точки которого меньше (или равны) соответствующей медианы. Оценкой качества моделей пусть будет отношение количества чисел (в данном случае чисел 0 и 1) в исходной таблице X к количеству этих чисел (в данном случае – количеству переменных $x_i | K_j, i, j = 1, 2, \dots$) в общей модели, соответствующей U и $\bar{U}$. Аналогичной будет оценка и для "односторонней модели (например, для $\bar{U}$). В этом случае числа берутся из $X | \bar{U}$. Таким образом, качество модели – это степень сжатия X по отношению к АМКЛ; в пределе, для идеальной случайной таблицы X это качество должно быть равно 1.

Оценку вероятности распознавания m -го режима при обучении на $m-1$ режимах можно ввести следующим образом. Из X вычеркивается первая строка, строится модель по оставшимся $m-1$ строкам и распознается класс эквивалентности (по y) первой строки, например, путем "голосования" – подсчитывается сумма $|G_j|$ "за" и "против" отнесения строки в U или $\bar{U}$, затем эта строка возвращается в X , вычеркивается вторая строка и т.д. Отношение общего числа ошибочных ответов к m назовем оценкой вероятности ошибки распознавания m -го режима при обучении на $m-1$ режиме, а число, дополняющее эту вероятность до 1 – оценкой вероятности P_m распознавания m -го режима. Аналогичным образом можно ввести эти оценки и для двух, трех и т.д. шагов (режимов) вперед.

Заметим, однако, громоздкость расчета этих оценок. Полагая, что для достаточно больших m модели, полученные по m и $m-1$ строкам, близки, получаем одинаковые P_m и P_{m-1} . Поскольку при вычеркивании любой j , входящей в K_j с оценкой $|G_j| = 1$, получаем те же самые оценки (при данном допущении), P

изменится лишь тогда, когда будет вычеркиваться j , входящая в область K_j , которой соответствует $|\Gamma| = I$ и, если данная K_j не входит в любую другую K_{j_2} . В этих случаях $P = I - I/m$, если же нет таких K_j , что $|\Gamma| = I$, или если происходит покрытие любой другой K_j , то в этом случае $P = I$. Аналогичным путем может быть вычислена оценка P на два и более шагов вперед. Заметим, что в приведенных далее моделях количество K_j с $|\Gamma| = I$ обычно мало, а если они и есть, то часто перекрываются другими K_j , так что оценка вероятности правильного прогнозирования m -го режима при обучении на $m - I$ в АМКП обычно довольно высока.

Более того, если бы цель работы заключалась только бы в решении задачи распознавания, то полезным было бы вычисление не тупиковых ДНФ, а заведомо избыточного числа K_j путем, например, запоминания их по всем j , или даже путем прохождения некоторого множества разветвляющихся путей, на которых возможно выявление K_j (в алгоритме АМКП всегда выбирается лишь одна ветвь). Однако цель данной работы лежит прежде всего в области исследования объектов в условиях информационной неопределенности, когда первостепенное значение придается привлечению априорной информации, т.е. интерпретации и пониманию исследуемого процесса. В этих условиях рационально построение тупиковых (или минимальных) ДНФ, поскольку устойчивость к помехам, согласно определениям из 2.3.2., определяется прежде всего $|\Gamma_j|$. Другая причина резкого ограничения числа K_j — выявление более правильного смысла K_j при медленном изменении многих нерегистрируемых переменных в условиях информационной неопределенности. Итак, в данной работе оценка P — это оценка прогнозирующей способности именно АМКП (идеологии, направленной на интерпретацию).

После этих замечаний приведем полученные модели и способ их интерпретации. K_j здесь упорядочены по $|\Gamma_j|$, в начале моделей стоят более значимые K_j .

$$\begin{aligned} & \bar{x}_6 \ x_8 \ x_{2I} \vee \bar{x}_5 \ x_{10} \ \bar{x}_{II} \vee x_6 \ x_{10} \ \bar{x}_{22} \vee \bar{x}_{10} \ x_{13} \vee \\ & \vee x_2 \ \bar{x}_{14} \ x_{2I} \vee x_5 \ \bar{x}_7 \ x_{II} \ \bar{x}_{18} \vee x_9 \ x_{II} \ \bar{x}_{22} \supset \bar{y}_6 \end{aligned} \quad (4.9.)$$

- модель для первой группы реакторов, сжатие $X | \bar{y}_6$ - в 1,4,4 раза, $P_{48} = 0,98$.

$$\begin{aligned} & x_2 \ \bar{x}_3 \ x_5 \vee \bar{x}_7 \ \bar{x}_{13} \vee x_2 \ x_5 \ \bar{x}_9 \vee \bar{x}_3 \ x_{12} \ x_{13} \vee \bar{x}_2 \ x_8 \ \bar{x}_{13} \vee \\ & \vee x_9 \ x_{II} \ \bar{x}_I \vee x_2 \ x_5 \ x_{13} \ \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_2 \ \bar{x}_5 \ \bar{x}_{12} \ x_{15} \supset \bar{y}_6 \end{aligned} \quad (4.10.)$$

- модель для второй группы реакторов, сжатие $X | \bar{y}_6$ - в 13,2 раза, $P_{61} = 0,98$.

$$\begin{aligned} & x_2 \ \bar{x}_{15} \ \bar{y}_4 \vee \bar{x}_7 \ x_{19} \vee x_{12} \ \bar{x}_{16} \ \bar{y}_3 \vee x_{II} \ \bar{y}_I \ \bar{y}_4 \vee x_{13} \ x_{19} \ \bar{y}_I \vee \\ & \vee x_2 \ x_3 \ \bar{x}_{12} \ x_{19} \vee x_7 \ \bar{x}_{12} \ \bar{y}_3 \vee \bar{x}_3 \ \bar{x}_7 \ \bar{y}_5 \vee x_{II} \ \bar{x}_{14} \ \bar{x}_{15} \vee \\ & \vee \bar{x}_I \ \bar{x}_{19} \ \bar{y}_4 \vee \bar{x}_3 \ \bar{x}_{II} \ \bar{x}_{19} \ \bar{y}_4 \supset \bar{y}_6 \end{aligned} \quad (4.11.)$$

- модель для второй группы реакторов с учетом $\bar{y}$, сжатие $X | \bar{y}_6$ - в 18,3 раза, $P_{61} = 0,97$.

Будем просматривать модель 4.9., начиная с наиболее значимых (устойчивых) K_j и сопоставлять с уже известными (априорными) теориями, выбирая их в порядке усложнения. Выводы из каждой последующей K_j могут или уточнять выводы, полученные из первой K_j , или описывать процесс с точки зрения новой теории (ведь формально выводы K_j во всех случаях истинны). Однако для некоторых K_j , например, при малых $|\Gamma|$, подходящих теорий может и

не существовать во время исследования.

Допустим, например, что для K_I истинна теория химического равновесия. Тогда при увеличении концентрации CO (x_8) реакция 4.1. должна сдвинуться вправо, в сторону увеличения концентрации метанола. Процентное содержание всех примесей при этом должно быть меньше, что соответствует $\bar{U}_6$. Итак, увеличение $x_8 | K_I$ не противоречит теории химического равновесия для реакции 4.1. Известно, что повышение нагрузки по свежему газу (x_{2I}) уменьшает максимальную температуру на полках ($\bar{x}_6$) из-за увеличения теплосъема с катализатора. Действительно, в K_I наблюдается конъюнкция переменных x_{2I} и $\bar{x}_6$. Итак, увеличение $x_{2I} | K_I$ не противоречит теории, отображающей динамику теплообмена в исследуемом аппарате. Далее, понижение температуры $\bar{x}_6$ вызывает сдвиг реакции 4.1. вправо, т.к. она экзотермична. Концентрация метанола при этом возрастает, что соответствует в итоге $\bar{U}_6$. Итак, уменьшение $\bar{x}_6 | K_I$ не противоречит теории теплового равновесия для реакции 4.1. Вода образуется в основном по реакции 4.7. и вышеприведенные теории (химического и теплового равновесия) соблюдаются и здесь. Реакция 4.7. в случае K_I сдвигается влево, что влечет $\bar{U}_6$.

Все эти выводы имеют качественный характер, для более детальной интерпретации можно взять систему уравнений гидродинамики, отображающую законы сохранения вещества и тепла [56]. Эта система должна решаться совместно с термодинамическим уравнением состояния системы, а также совместно с некоторыми другими уравнениями.

Решение общей системы уравнений представляет здесь почти непреодолимые трудности, вследствие чего эту систему приходится упрощать тем или иным способом. АМКП дает возможность обоснования такого упрощения, причем здесь становятся заранее известны-

ми интервалы, в которые заключены значения всех существенных переменных (существенных в смысле их достаточности для разделения на заданное число классов эквивалентности). Метод АМКП здесь полезен именно в силу своей конструктивности - всегда можно вначале задать наименьшее требование к исследуемой системе - различие лишь, например, для двух классов $У$. Далее подбираются лишь те уравнения из общей системы, которые имеют своих представителей в АМКП, например, отбираются те уравнения, которые соответствуют компонентам смеси, вошедшим в K_1 , K_2 и т.д. по рангам $|Г|$. Все эти соображения позволяют резко ограничить сложность решаемой системы уравнений.

Так, для рассматриваемого случая следовало бы написать систему уравнений гидродинамики, отображающей законы сохранения вещества по крайней мере для 10 компонентов, теперь же, для построения аналитической модели по K_1 нужен лишь 1 компонент $СО$. Соответствующие общие уравнения известны [56] и они здесь не приводятся из-за громоздкости, а также потому, что их решение было бы необходимо лишь, например, для реализации соответствующего вида управления или проверки гипотез, касающихся правильности отображения процесса, описываемого этой системой уравнений. Данная диссертационная работа в этом отношении имеет целью показать лишь возможность конструктивной (с возрастающей степенью сложности) реализации такого подхода. Большое разнообразие K_j в АМКП, как это видно из вышеизложенного, несет в себе весьма богатую информацию, выявляемую при сопоставлении с уже известными теориями. Возможно, что в дальнейшем, при использовании достаточно эффективно работающих информационных систем поиска содержательных теорий в существующей литературе, АМКП можно будет рассматривать как некоторый "генератор гипотез", уже оправдавшихся на использованных массивах X , $У$. Отметим,

что K_1 , для которых не была найдена подходящая теория, ценны с информационной точки зрения тем, что эти выводы содержат элементы новизны.

Рассмотрим теперь технологическую ситуацию $K_2 = \bar{X}_5 \times_{10} \bar{X}_{11}$ (она стоит на втором месте по оценке $|\Gamma_2|$, т.е. на втором месте по частоте встречаемости). Эта ситуация заключается в том, что понижение температуры на последней полке колонны, повышение концентрации метана и понижение концентрации азота в свежем газе вызывает понижение содержания воды в метаноле-сырце. Будем придерживаться принципа "экономии" - вначале пробуем сохранить первую теорию (соответствующую K_1 , возможно, лишь уточняя ее). Если условия K_1 сохраняются, то во входящем свежем газе к тому же увеличивается содержание метана, что сдвигает реакцию 4.4. влево, т.е. в сторону уменьшения образования воды, что согласуется с K_2 , как и ранее увеличение потока свежего газа (K_1) ведет к снижению температуры на выходе и к тому же подавляется образование тепла по реакции 4.4. Таким образом, число компонентов в системе уравнений, которую необходимо решить, возрастает теперь до двух. На этом связь со старой теорией кончается - переменная $\bar{X}_{11}$ указывает, что старая теория должна быть принципиально усложнена - ведь в рассмотренном списке реакций нет азота - он не входит здесь в химические реакции. [Дополним ранее приведенную теорию, пусть, например, кинетика рассматриваемого гетерогенно-каталитического процесса соответствует [56] изотерме Лангмюра - молекулы, прежде чем вступить в реакции, должны быть сорбированы на активной поверхности катализатора. В данном случае азот (при понижении его концентрации) занимает уже меньшую часть активной поверхности катализатора, что в свою очередь влечет возрастание адсорбции остальных, принимающих участие в химических превращениях, и

прежде всего CO , который всегда присутствует в избытке. Это ведет к сдвигу основной (4.1.) реакции в сторону образования метанола, реакция 4.8. соответственно сдвигается влево и воды образуется меньше. Как и раньше, соответствующие уравнения адсорбции известны [56] и здесь они ^{не} приводятся, отметим лишь, что эти уравнения опять весьма существенно упрощаются – число рассматриваемых компонентов будет равно лишь трем (при решении общей системы уравнений влияние остальных переменных будет отображено соответствующими значениями рассчитываемых неизвестных констант). Подобным же образом можно уточнить теорию при дополнительном использовании K_3 и т.д.

Останавливаясь (в процессе интерпретации) на K_1 и K_2 отметим в итоге, что при работе реакторов I группы (содержание CO_2 в свежем газе около 4,4%) требуется повысить расход энергии и свежего газа и очищать его от инертных газов. В этом случае содержание воды в метаноле-сырце уменьшается в среднем с 13,6% до 10,6%.

Полученные выводы имеют в основном проектный характер – они позволяют не только оптимизировать существующее производство, но и с помощью подходящей, достаточно простой теории рассчитать процесс при иных, еще не наблюдавшихся значениях переменных и затем, с помощью, например, экономических критериев, выбрать нужный регламент производства. До сих пор подобные расчеты были затруднительны из-за сложности решения громоздкой системы уравнений или из-за плохих результатов, наблюдавшихся при недостаточно обоснованных упрощениях.

Степень сжатия таблицы X (в итоге моделирования) учитывает с одной стороны количество чисел, которые нужно было бы запомнить, если бы не конструировалась АМКЛ, т.е. нужно было бы запомнить все ($m/2$) благоприятные режимы. С другой стороны

подсчитывается количество чисел α , β или, в данном случае, количество медиан, которые необходимы для формирования булевой формы АМКЛ. Отношение большей величины к меньшей дает здесь степень сжатия исходных данных. Путем незначительного усложнения расчетов можно было бы рассчитать здесь информационную энтропию, соответствующую АМКЛ.

K_I и K_2 в модели 4.9. имеют наибольшие оценки, эти импликанты покрывают примерно треть благоприятных режимов. Вышеприведенная интерпретация частично отображена в работе [57].

Рассмотрим модель 4.10., отображающую работу II группы реакторов [58] (содержание CO_2 в свежем газе равно примерно 2,7%). Для первой импликанты $K_I = x_2 \bar{x}_3 x_5$ из ранее упоминавшейся системы уравнений надо выбрать уравнение, отображающее баланс тепла, поскольку в K_I не входят переменные, соответствующие каким-либо компонентам реакций 4.1.-4.8., но указывается зависимость от давления и температуры первой x_3 и последней x_5 полки реактора. При увеличении x_2 будут сдвигаться вправо те реакции (в основном 4.1. и 4.8.), которые протекают с сокращением исходного объема. Реакция 4.7., по которой в основном образуется вода, протекает без изменения объема, поэтому повышение давления на нее не должно существенно влиять. Итак, увеличение x_2 должно приводить согласно этой теории к $\bar{y}_6$, что действительно наблюдается в K_I . Аналогичным образом действует $\bar{x}_3$, что соответствует ситуации, разобранный при интерпретации K_I , модель 4.9. Повышение температуры на последней полке x_5 здесь можно объяснить тем, что для второй группы реакторов на вход подавался свежий газ с меньшим содержанием CO_2 , что приводило к меньшей роли экзотермической реакции 4.7.

Следующая импликанта $K_2 = \bar{x}_7 \bar{x}_{I3}$ уточняет вышеприведенную теорию - уравнение баланса тепла следует дополнить уравнени-

ями, отображающими баланс CO_2 в свежем газе x_7 и в циркуляционном газе x_{13} . Уменьшение x_7 и x_{13} сдвигает реакции 4.7. и 4.8. влево, что приводит к уменьшению содержания воды в метаноле.

Следующая импликанта $K_3 = x_2 x_5 \bar{x}_9$ уточняет теорию, соответствующую K_1 и K_2 - вводятся уравнения, в которые входит H_2 , уменьшение парциальных давлений которого приводит к снижению роли побочных реакций, судя по коэффициентам при H_2 в записях реакций 4.1.-4.8. (x_5 - концентрация H_2 в свежем газе). Роль повышенного давления x_2 и повышенной температуры x_5 была уже уточнена теорией, соответствующей K_1 . Отметим еще, что из специально организованных экспериментов известно, что повышение давления в реакторе и понижение температуры (на входе) процесса способствует увеличению скорости образования метанола относительно скорости образования побочных продуктов (и, в частности, воды). Таким образом, модель 4.10. позволяет получить такие же (или даже более детальные) выводы значительно более легким путем - по текущим данным с анализируемого объекта, т.е. без специальной организации экспериментов, которые в промышленных условиях весьма затруднительны.

Модель 4.9. отображает прежде всего адсорбцию и баланс CO , возможно потому, что в данном варианте процесс проводился при больших концентрациях CO_2 в свежем газе, когда определяющим моментом является конкуренция между CO и CO_2 при их адсорбции на катализаторе. Модель 4.10. отображает прежде всего тепловой баланс процесса возможно потому, что эта группа реакторов работала на свежем газе, содержащем примерно в 19 раз больше азота. На это косвенно указывает $K_6, x_9 x_{11} \bar{x}_1 \supset Y_6$ - малое содержание воды в метаноле при большом содержании азота x_{11} возможно лишь в том случае, если катализатор свежий ($\bar{x}_1$) и све-

жий газ содержит повышенный процент H_2 (x_9).

Модель 4.10. интересна тем, что в качестве входа X были использованы как входные, так и часть выходных технологических переменных U_1, U_2, U_3, U_4 и U_5 , т.е. другими словами, исследовалась целесообразность конструирования уравнения с помощью обратной связи (U – состав метанола-сырца по 6 компонентам).

Импликанта $K_I = x_2 \bar{x}_{I5} U_4$ указывает на возможность регулирования с помощью концентрации непредельных соединений на входе – при их малом количестве U_4 наблюдается также малое содержание воды в метаноле (лишь при повышенном давлении x_2 и при малом содержании H_2 в циркуляционном газе). Поскольку в K_I входит повышенное давление, то существенным фактором здесь, влияющим на U_6 , представляется, как и ранее, сдвиг основной реакции (4.1.) вправо, для которой наблюдается наибольшее изменение объема. Сравнительно с 4.1. реакция, по которой образуются непредельные соединения (4.6.), менее сильно зависит от изменения объема и, как следствие, непредельных соединений в ситуации K_I меньше. Аналогичным образом могут быть интерпретированы и последующие K . Как весьма интересный случай отметим

$K_3 = x_{I2} \bar{x}_{I6} U_3$, цель может выполняться даже при большом содержании альдегидов в продукте, однако для этого требуется повышение отношения H_2/CO в свежем газе и лучшее удаление инертных газов из циркуляционного газа.

Ограничимся рассмотрением K_j с наибольшими оценками и отметим в итоге возможность их чисто качественной интерпретации – согласия с теми простыми видами зависимостей, которые следуют из записи реакций 4.1.–4.8. и основных (качественных) законов химического равновесия, адсорбции и т.д. Возможно, что именно первое противоречие на этом пути должно быть сигналом перехода к количественным методам интерпретации – решения соответству-

щих систем уравнений.

Конечно, сам факт получения выводов K_j непротиворечивых не только по отношению к исследованным массивам X и Y , но и по отношению к основным законам химического и теплового равновесия, адсорбции и т.д. весьма примечателен.

Можно сказать, что K_j таковы, что на основе фактически допускаемых способов умозаключений (в конструктивной математике) может быть выведена импликация "из содержательной теории Ω' (теории физики, химии и т.д.) следует K_j ". Другими словами, АМКП (в общем смысле) есть алгоритм, позволяющий по любому суждению K_j осуществить поиск суждения Ω' , являющегося мажорантой для K_j [59]. Так, например, по каталожной карточке с рефератом K_j ищется книга Ω' , $\Omega' \supset K_j$.

Можно также сказать, что некоторая последовательность АМКП реализует иерархию алгоритмов, строящих мажоранты для суждений K_j , и этим алгоритмам соответствует иерархия способов приближенного разъяснения суждений K_j [59].

Вкратце еще отметим, что спустя примерно через год после регистрирования данных, по которым была получена модель 4.10., в цехе синтеза метанола регистрировались режимы, где наблюдалась ситуация $x_2 \bar{x}_3 x_5 \supset \bar{y}_6$ и где такая ситуация не наблюдалась. Средняя прибавка содержания метанола в сырце (в режимах $x_2 \bar{x}_3 x_5$) составила 0,7%. Таким образом, следует отметить в данном случае большую устойчивость выводов с наибольшими оценками, в частности, вывод K_j продолжал оставаться истинным в течение года или более.

Итак, модели 4.9.-4.11. (и приведенное выше их сопоставление с литературными данными) дают ответ на основную цель данного исследования реакторов синтеза метанола — выявить причины, влияющие на содержание воды в метаноле-сырце. Сами же формулы

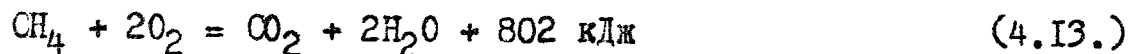
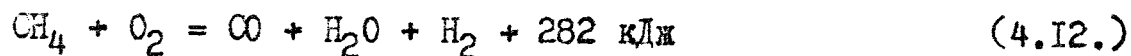
4.9. - 4.II. есть списки простых и конструктивных рекомендаций для проектирования более точной и более совершенной системы управления синтеза метанола в промышленных условиях.

4.2. Исследование содержания ацетилена на выходе цеха окислительного пиролиза природного газа

Экономичность процесса окислительного пиролиза природного газа до ацетилена в значительной степени зависит от содержания ацетилена в газе пиролиза. В промышленных условиях реакторы пиролиза обычно объединяют в группы. Из-за колебания режимов по отдельным реакторам средний процент ацетилена на выходе из цеха обычно меньше оптимального, наблюдаемого на отдельных реакторах. Опытный оператор может иногда достаточно удачно учитывать индивидуальные различия реакторов и подбирать соответствующее управление, основываясь на накопленном опыте. С помощью АМКП удастся, как будет показано, имитировать действия опытного оператора, причем с гораздо большей детализацией и обоснованностью. Часть рекомендаций, полученных таким образом, может указывать на необходимость использования средств автоматики или применения УВМ, другая же часть хорошо интерпретируемых теоретически рекомендаций могут быть включены в регламентные условия проведения процесса. Если эти рекомендации связаны, например, с изменениями конструктивных особенностей реакторов, они могут быть включены в дальнейшие проектные работы.

В качестве первого этапа в настоящей диссертации была поставлена более простая методическая задача - выяснить возможность использования АМКП для получения выводов, которые имели бы конструктивный характер (в смысле выдачи рекомендаций проектировщикам) или которые можно было бы использовать для текущей оптимизации процесса.

Основные реакции, отображающие химизм образования ацетилена имеют вид [79]:



Суть процесса заключается в следующем [61]. Предварительно нагретые природный газ и технический кислород смешиваются и затем поступают в реакционную зону, пройдя через горелку реактора. В результате реакции, происходящей в пламени, примерно 30% метана превращается в ацетилен, затем продукты реакции поступают в зону закалки, где для предохранения ацетилена от разложения в факел впрыскивается горячая и затем, по ходу потока, холодная вода.

В таблице 4.2. приведены медианы переменных.

Все три обследования производились с интервалом примерно полгода. Последнее (3) обследование проводилось над системой совместно работающих реакторов, поскольку последние принципиально не отличались между собой, для них введены единые медианы (по каждой переменной).

При первом обследовании (один реактор) в качестве целевой переменной взяты показания автоматического газоанализатора на ацетилен y_5 , которые пересчитывались на чистый y_5 путем введения поправок, учитывающих содержание аналогов ацетилена. Остальные значения y здесь не учитывались. Всего было обследовано

$m = 52$ стационарных режима, которые имели место примерно в течение трехмесячного периода.

$$\begin{aligned} & x_2 \ x_9 \ \bar{x}_{17} \ \vee \ x_2 \ \bar{x}_3 \ x_{23} \ \vee \ x_4 \ x_{14} \ y_1 \ \vee \ x_9 \ \bar{x}_{12} \ \vee \ x_4 \ \bar{x}_5 \ x_{19} \ \vee \\ & \vee \ x_{18} \ y_2 \ \vee \ x_{10} \ x_{13} \ x_{19} \ \vee \ x_{13} \ x_{18} \ y_1 \ \vee \ \bar{x}_{17} \ \bar{x}_{20} \ \bar{x}_{21} \ \vee \\ & \vee \ x_4 \ x_7 \ \supset \ y_5 \end{aligned} \quad (4.15.)$$

Таблица 4.2.

Значения переменных и их медиан для
I, 2, 3 обследований реакторов

Переменные	Обозначения	Медианы обследований			
		I	2	3	
I	2	3	4	5	
Содержание O_2 в тех. кислороде, объемный %	x_1	95,05	94,90	93,75	
Состав природного газа, объемный %, кислорода	x_2	0,005	0,007	0,012	
азота	x_3	1,9	1,9	-	
метана	x_4	94,3	93,4	91,8	
этана	x_5	1,975	1,975	-	
углекислоты	x_6	0,805	0,805	-	
пропана	x_7	0,714	0,714	-	
и-бутана	x_8	0,156	0,156	-	
н-бутана	x_9	0,183	0,178	0,220	
и-пентана	x_{10}	0,0675	0,675	-	
н-пентана	x_{11}	0,0485	0,485	-	
Плотность, $кг/м^3$	x_{12}	0,7625	0,7625	-	
Расходы, норм. $м^3/час$:					
природного газа	x_{13}	3460	3200	3295	
кислорода	x_{14}	2165	1880	2215	
кислорода стабилизирующего на горелку:					
по центру	x_{15}	20,1	17,3	14,4	
по краю	x_{16}	29,5	29,5	-	
воды горячей	x_{17}	27,3	26,5	26,5	
воды холодной	x_{18}	26,5	26,5	-	

продолжение табл.4.2.

I	:	2	:	3	:	4	:	5
Температура, °C:								
природного газа	x_{19}	612		623		613		
кислорода	x_{20}	616		623		613		
смеси	x_{21}	617		623		-		
пирогаза после закалки	x_{22}	88,5		88,5		-		
Перепад давления, кПа,								
на реакторе	x_{23}	24,2		24,2		-		
на выходе	x_{24}	109		109		-		
Состав пирогаза,								
объемный %, метана	y_1	3,55		-		-		
кислорода	y_2	0,23		-		-		
водорода	y_3	-		54,25		-		
непредельных	y_4	-		0,45		-		
ацетилена	y_5	7,90		7,95		7,95		
углерода (усл.ед.)	y_6	-		-		7,00		
диацетилена в готовом продукте	y_7	-		0,0045		-		

Интересно отметить, что модель 4.15, имеет большую степень сжатия, чем модель, соответствующая $\bar{y}_5$ (повидимому, условия, ведущие к повышенному содержанию ацетилена y_5 , имеют более определенный характер, в то время как $\bar{y}_5$ может определяться весьма большим разнообразием причин, вплоть до явных нарушений режимов производства).

Процессы, происходящие в пламени, во многих случаях достаточно удачно описываются теорией газового факела [60]. При горении однородной газовой смеси в условиях, когда существенен учет

турбулентности, весьма удобен расчет факела на основе сочетания методов теории турбулентных струй и теплового режима горения. Обычно в этом случае вводят ряд упрощающих предположений, например, что фронт пламени расположен в месте, отвечающем максимально возможной температуре и, соответственно, полноте сгорания и что плотность потоков до и после фронта не меняется. Далее применяют основные уравнения гидродинамики, записанные для стационарного асимметричного турбулентного слоя газа. Эти уравнения записывают в виде, отображающем тождественность некоторых свойств автомодельных струйных течений сжимаемого газа и несжимаемой жидкости (уравнения движения, энергии, диффузии, непрерывности и уравнения, отображающие граничные условия на фронте пламени – уравнения материального и теплового баланса и уравнения связи диффузионных потоков топлива и окислителя). Все эти 7 зависимостей записывают для каждого компонента реакций 4.12. – 4.14., т.е. надо решить совместно несколько десятков уравнений. Это решение даже для случая простого горения представляет значительные трудности. Однако процесс получения ацетилена существенно зависит и от закалки газов пиролиза водой, которая вспрыскивается в факел на определенном расстоянии от горелки. За счет испарения воды отбирается тепло и охлаждаются легко разлагающиеся продукты пиролиза; известно соответствующее эмпирическое уравнение, отображающее скорость падения температуры пирогаза от времени в процессе закалки [61]. Для краткости изложения, как и ранее, не будем записывать соответствующие громоздкие системы уравнений, которые подробно разбираются в [60, 61]. Из всего вышеизложенного можно лишь сделать вывод, что именно громадные вычислительные трудности, связанные не только с решением большого числа уравнений, но и с неопределенностью (неизвестностью) многих граничных условий являются пре-

пятствием для получения практически полезных решений.

АМЖП позволяют здесь значительно увеличить определенность решений за счет конструирования граничных условий, относительно которых заведомо известно, что их соблюдение приводит к выполнению цели (y_5), а также за счет упрощения соответствующей системы уравнений (и возможности, если это потребуется, постепенного усложнения этой системы).

Рассмотрим $K_I = x_2 \ x_9 \ \bar{X}_{I7}$ из 4.15., покрывающую наибольшее число технологических ситуаций j в X . Поскольку в K_I входят лишь два компонента, принимающих участие в реакции пиролиза (x_9 — н-бутан и x_2 — следы кислорода в природном газе), соответствующая система уравнений значительно ограничивается. Более того, участие x_2 в K_I позволяет предложить гипотезу о значительной роли предварительного смешения и диффузии кислорода и природного газа. Это позволяет (во всяком случае для K_I) ограничиться решением лишь уравнения диффузии для x_2 и x_9 для построения наиболее простой теории пиролиза природного газа до ацетилена (роль закалки $\bar{X}_{I7}$ будет обсуждаться далее). Согласно этой упрощенной "диффузионной теории" повышение концентрации кислорода и н-бутана вызывает увеличение их взаимной диффузии, что является необходимым условием вступления их в реакцию. Просматривая список K_j (как обычно, K_j расположены в порядке убывания $|\Gamma_j|$), можно отметить, что гипотеза "повышение концентрации реагентов влечет повышение концентрации ацетилена" оправдывается по крайней мере на четырех импликантах в начале списка 4.15. Так в K_2 входит пониженная концентрация инертного газа (азота), который не входит в реакцию, что приводит к согласованию K_2 с диффузионной теорией после ее незначительного усложнения.

Итак, знание ситуаций $K_I - K_4$ позволяет ограничить число

рассматриваемых компонентов и уточнить граничные условия при решении соответствующих уравнений диффузии и материальных балансов.

Практика эксплуатации реакторов пиролиза показывает, что с уменьшением содержания инертных в техническом кислороде содержание ацетилена в пирогазе возрастает [61]. Производительность реакторов увеличивается при использовании сильно турбулентного пламени, так как в этом случае возрастает диффузия компонентов.

Отметим еще импликанту $K_5 = x_4 \bar{x}_5 x_{I9}$ — этан $\bar{x}_5$ составляет малую долю в природном газе и основной эффект увеличения концентрации реагирующего компонента здесь будет определяться метаном x_4 . Повышенный же нагрев природного газа x_{I9} согласно реакции 4.14. приводит ее к сдвигу в сторону образования ацетилена.

Обсудим теперь роль закалки в $K_I = x_2 x_9 \bar{x}_{I7}$, где $\bar{x}_{I7}$ — уменьшенный расход горячей воды на закалку. Можно сказать, что в тех случаях, когда исходный газ содержит повышенные количества кислорода и легко разложимого н-бутана, для достижения цели (y_5) требуется меньше горячей воды, что ведет к меньшей скорости падения температуры вдоль оси факела согласно эмпирическому уравнению закалки [61]. В этих условиях факел удлиняется — образовавшийся на сравнительно малом расстоянии от горелки ацетилен (при повышенном содержании легко разложимого н-бутана) может достичь закалочного устройства, где вспрыскивается холодная вода.

Итак, польза модели 4.15. заключается здесь в том, что она указывает на приемлемость диффузионной теории, которая более проста, чем полная система уравнений. Одновременно указывается набор простых рекомендаций K для оптимизации процесса. Как было показано выше, основное множество этих рекомендаций хорошо

увязывается с традиционной теорией газового факела с дополнительными условиями, определяющими процесс закалки.

Примерно через полгода было проведено второе обследование этого же реактора. Содержание следов кислорода в природном газе было повышено и, согласно рекомендациям, полученным после первого обследования, был уменьшен расход горячей воды для закалки.

Было изучено 53 режима, модель имеет следующий вид (как и в 4.15. состав пирогаза не принимался во внимание):

$$\begin{aligned} & x_{I4} \bar{x}_{I7} \bar{x}_{I9} \vee x_4 x_{I3} \bar{x}_{I5} \vee x_2 x_{I5} \bar{x}_{I9} \vee x_I \bar{x}_{I4} \bar{x}_{I3} \vee \\ & \vee \bar{x}_4 \bar{x}_I \bar{x}_{20} \bar{x}_{I9} \vee x_4 x_I \bar{x}_{I9} \vee \bar{x}_2 \bar{x}_9 x_{I7} \bar{x}_{I9} \vee \\ & \vee x_4 x_I x_{I4} \supset y_5 \end{aligned} \quad (4.16.)$$

Судя по таблице медиан 4.2. y_5 здесь увеличен, возможно, вследствие частичного выполнения ранее найденных рекомендаций 4.15. В импликанте $K_I = x_{I4} \bar{x}_{I7} \bar{x}_{I9}$ отметим прежде всего конъюнкцию x_{I4} и $\bar{x}_{I9}$ - при понижении температуры предварительного нагрева природного газа $\bar{x}_{I9}$ должен быть повышен расход кислорода x_{I4} , что полностью объясняется тепловым балансом реакций 4.12. - 4.14. K_I уточняет также условия, при которых для закалки пирогаза требуется малое количество горячей воды $\bar{x}_{I7}$. Ранее (модель 4.15.) отмечалось, что таким условием должно быть улучшение диффузии кислорода и н-бутана. Согласно модели 4.16. дополнительно требуется также более точное регулирование процесса с компенсацией возмущения $\bar{x}_{I9}$. Так, согласно K_I падение температуры природного газа должно быть компенсировано увеличением расхода кислорода. Ограничимся обсуждением в 4.16. лишь первой, наиболее часто встречающейся ситуацией.

Приведем теперь модель 4.17., вычисленную по тем же данным, но где учитывался также состав пирогаза полностью (У):

$$\begin{aligned} & x_4 \bar{x}_{I9} \bar{y}_I \vee x_2 x_{II} y_I \bar{x}_{20} \vee \bar{x}_{I7} \bar{x}_{20} y_7 \vee x_I x_{I4} \bar{x}_{I3} \vee \\ & \vee x_I x_4 \bar{x}_{I9} \vee x_{I7} x_{I9} y_4 y_3 \vee \bar{x}_{I5} y_4 y_7 \vee \bar{x}_{I3} \bar{x}_{20} y_I y_7 \vee \\ & \vee x_I x_{I4} x_{I3} x_{I5} \bar{y}_3 \supset y_5 \end{aligned} \quad (4.17.)$$

В этой формуле K_j имеют меньшие оценки и больший ранг, чем K_j в модели 4.16., т.е. с информационной точки зрения модель 4.17. уступает по качеству модели 4.16. Однако с методической стороны она полезна тем, что выявляет пользу вариационного подхода к решению задачи — изменения числа переменных в X и отбора более информационных моделей. Введение дополнительных переменных в 4.17. оправдано также тем, что оно позволяет оценить с помощью известных литературных (теоретических) данных, например, гипотезу $K_I = x_4 \bar{x}_{I9} \bar{y}_I$ — насколько целесообразно проектирование управляющего устройства, использующего для оптимизации исследуемого процесса (в качестве обратной связи) содержание метана y_I в пирогазе.

Согласно теории "полноты сгорания" [60], процентное содержание горючего компонента на фронте пламени уменьшается при увеличении теплотворности смеси и при уменьшении ее подогрева. Это и наблюдается в $K_I = x_4 \bar{x}_{I9} \bar{y}_I$, где x_4 — увеличенное содержание метана в смеси, $\bar{x}_{I9}$ — уменьшенный нагрев природного газа и $\bar{y}_I$ — малое содержание метана в пирогазе (содержание его на фронте пламени примерно соответствует содержанию в пирогазе).

Для второго обследования по сравнению с первым характерно (см. медианы в табл. 4.2.) снижение расходов стабилизирующего кислорода по центру горелки, расходов природного газа и кислорода на входе в реактор. Эта ситуация приводит к сдвигу режима го-

рения в область, где возможны частные явления затухания и воспламенения (эти режимы следуют из совместного решения общей системы уравнений теории газового факела [60]). Возможно, что именно поэтому для K_I оказались существенными пониженные значения концентрации метана в пирогазе. При режимах, близких к затуханию факела, эта концентрация метана возрастает, что соответствует уменьшению концентрации ацетилена.

После изучения работы отдельного реактора была исследована работа пиролизного отделения цеха окислительного пиролиза природного газа. В цехе работало на общий коллектор ацетилена семь реакторов (в различных сочетаниях) из общего числа, равного восьми, один реактор обычно находился на профилактическом осмотре. Всего было зарегистрировано 116 следующих друг за другом режимов, которые записывали раз в смену. Дополнительно регистрировалась еще чистота стенок реакторов, промежуток времени между чистками делили пополам, соответствующее время (в сутках) внесено в табл. 4.2. Общее число переменных было равно 47, переменные, относящиеся к определенному реактору имели вторые индексы, соответствующие номеру реактора.

$$\begin{aligned}
 & \bar{x}_1 \bar{x}_{171} \bar{x}_{157} \vee \bar{y}_6 \bar{x}_4 x_{173} \bar{x}_{193} \vee x_9 x_{191} \bar{x}_{153} \vee \\
 & \vee \bar{y}_6 \bar{x}_{204} x_{154} x_{173} \vee \bar{x}_{142} \bar{x}_{155} \vee \bar{y}_6 \bar{x}_{205} x_{152} \vee \bar{x}_{141} x_{131} \vee \\
 & \vee x_{192} \bar{x}_{193} x_{197} \vee \bar{x}_1 \bar{x}_{138} \bar{x}_{208} \vee \bar{x}_{192} x_{136} \bar{x}_{132} \vee \\
 & \vee \bar{x}_{193} x_{137} \bar{x}_{197} \bar{y}_6 \vee \bar{x}_{201} \bar{x}_{152} \bar{x}_4 x_{192} \vee \bar{x}_{177} \bar{x}_{154} x_2 \vee \\
 & \vee \bar{x}_{154} x_{155} \bar{x}_{137} \supset y_5, \quad R_{116} = 0,99 \quad (4.18.)
 \end{aligned}$$

Из модели 4.18. видно, что в K , часто включаются переменные, относящиеся к различным реакторам — выявляются такие взаимодействия реакторов, которым соответствует повышенное со-

держание ацетилена в общем коллекторе. Общими здесь являются переменные, отображающие состав природного газа и степень отложения сажи (реакторы чистились почти одновременно).

Рассмотрим $K_I = \bar{X}_I \bar{X}_{I7I} \bar{X}_{I57}$, которая соответствует наиболее часто встречающейся ситуации в цехе - взаимодействию реакторов I и 7. В ситуации $\bar{X}_I \bar{X}_{I7I}$, где $\bar{X}_I$ - пониженное содержание кислорода в техническом кислороде и $\bar{X}_{I7I}$ - пониженный расход воды при закалке, оба значения этих величин указывают на увеличение длины факела. Действительно, из решения общей системы уравнений теории газового факела известно, что снижение теплотворности горючей смеси, например, при разбавлении инертным газом вызывает смещение фронта пламени по ходу потока - происходит удлинение факела. Значение $\bar{X}_{I7I}$ также указывает на удлинение факела (из решения уравнения закалки). Таким образом K_I указывает на то, что повышение содержания ацетилена в общем коллекторе в большом числе случаев зависит от таких ситуаций, когда длина факела в реакторе I увеличивается.

Далее, согласно K_I , эта ситуация выявлялась тогда, когда одновременно наблюдалось пониженное содержание кислорода в техническом кислороде и пониженный расход стабилизирующего кислорода по центру горелки в реакторе 7. Согласно уже упоминавшейся теории "полноты сгорания" при уменьшении теплотворности смеси за счет подачи малого количества кислорода происходит увеличение содержания горючего на фронте пламени и, одновременно, происходит удлинение факела. В этих условиях большая доля горючего распределяется по фронту пламени, его поверхность (зона, где происходит реакция) увеличивается.

Следующая по значимости импликанта $K_2 = \bar{Y}_6 \bar{X}_4 x_{I73} \bar{X}_{I93}$

относится лишь к реактору 3. АМКП в достаточно сложной системе из многих работающих реакторов выделяет в данном случае ситуацию, которая зависит лишь от одного реактора, что значительно облегчает интерпретацию K_2 . Пониженное содержание CH_4 и повышенное - н-бутана (согласно таблице медиан) говорит о том, что природный газ при данном обследовании был обогащен компонентами, более легко разлагающимися при нагреве. В этих условиях оказались полезными пониженная температура нагрева газа и более интенсивная закалка пирогаза. Ограничимся здесь интерпретацией лишь K_1 и K_2 .

Исследование с помощью АМКП технологических процессов синтеза ацетилена и метанола показало принципиальную возможность реализации информационного поиска (подбора) непротиворечивых простых теорий на основании некоторых наиболее значимых качественных признаков K . Как показали вышеприведенные примеры, этот подбор достаточно конструктивен - для выявленных теорий всегда можно указать конкретные "конструкции" (реализации), когда они действительно наблюдались и нельзя привести ни одного примера из накопленных массивов данных X , Y , которые бы им противоречили. Эта непротиворечивость может исчезнуть при увеличении числа строк в X и Y , однако новая обработка данных приводит опять к непротиворечивым формулам АМКП. Возможно, что использование достаточно мощных ЭВМ может привести на данном пути к подлинному знанию (объяснению) сложных объектов при наличии априорных данных. При исследовании объектов, для которых нет подходящей априорной информации, роль последней частично может выполнить множество уже ранее разработанных АМКП исследуемого объекта.

Итак, модели (4.15) - (4.18) совместно с приведенной интерпретацией дают ответ на цель исследования - выявлена воз-

возможность увеличения содержания ацетилена в общем коллекторе на выходе из цеха окислительного пиролиза. Эти модели могут использоваться, например, для управления процессом путем непосредственной реализации K_j в тех случаях, когда вектор состояния управляемого объекта соответствует K_j . Однако основная положительная сторона этих моделей заключается в том, что K_j с помощью информационного поиска могут быть интерпретированы как простые содержательные гипотезы — условия выполнения цели исследования (управления). С этой точки зрения АМКП есть список содержательных теорий, которые могут быть использованы как для проектирования, например, более экономичных технологических процессов, так и для проектирования соответствующих АСУ, функционирующих в более широком диапазоне данных по сравнению с исследованным процессом.

4.3. Анализ смесей бензола, толуола и хлорбензола по спектрам поглощения

В этом подразделе будут вкратце описаны возможности применения АМКП в булевой форме для выделения небольшого числа спектральных позиций и соответствующих им значений оптических плотностей для опознавания соответствующих интервалов концентраций бензола, толуола и хлорбензола в их смесях. Предложенный метод оказался полезным для решения некоторых задач управления ХТС, когда важна оперативность получения сведений о составе смесей и одновременно не требуется особой точности. Этот метод также полезен для определения наборов таких интервалов концентраций компонентов неаддитивных смесей, для которых уже достаточно точно выполняется линейная зависимость оптических плотностей от концентраций компонентов смеси. Следует отметить значительный отклик в научных публикациях по возможности

использования АМКП в булевой форме с этой точки зрения [63-72].

В данном исследовании [63] были приготовлены 20 смесей с различными концентрациями компонентов, значения которых находились как внутри интервала, соответствующего производственному регламенту, так и вне этого интервала. Класс концентраций, значения которых меньше регламентных, кодировались как 0, регламентные – как 1, а больше регламентных – как 2. Значения оптических плотностей Y разбивали также на 3 интервала так, чтобы в каждом из них находилось примерно одинаковое количество значений Y .

Измерения проводили на спектрометре UR-10 с призмами $NaCl$ и KBr , сила тока на глобаре 13,5 А, скорость развертки спектра $150 \text{ см}^{-1}/\text{мин}$, целевая программа 4, усиление 5,7, длина кюветы 0,04 мм. В таблице 4.3 представлены значения переменных и координаты соответствующих двух точек разбиений, разделяющих классы эквивалентностей 0 и 1, 1 и 2 ("0 - 1", "1 - 2").

Цель исследования заключалась в опознании диапазонов входных переменных x_1, x_2, x_3 по вектору Y выходных данных (т.е. по оптическим плотностям при различных спектральных позициях), поэтому в данном случае X играет роль целевых значений.

Модель системы смесей имела следующий вид:

$$\begin{aligned} y_2^I \vee y_5^I \vee y_6^I \vee y_{22}^I &\supset x_1^I \vee x_2^I \vee x_3^I, & y_{19}^I \vee y_2^I \vee y_5^I &\supset x_2^I \\ y_5^2 \vee y_{17}^2 &\supset x_1^2, & y_{19}^0 \vee y_{15}^0 &\supset x_2^0 \\ y_5^I &\supset x_1^I, & y_8^2 \vee y_6^2 &\supset x_3^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_5^0 / y_{23}^0 &\supset x_1^0, & y_8^I &\supset x_3^I, \\
 y_{19}^2 / y_{15}^2 &\supset x_2^2, & y_8^0 &\supset x_3^0, \quad (4.19)
 \end{aligned}$$

где переменные имеют вид x^e, y^e ; $e = \{0, I, 2\}$.

Точность модели (4.19) определялась опытным путем. Было приготовлено 9 "экзаменационных" смесей, концентрации компонентов которых принадлежали соответствующим интервалам, но не совпадали с ранее использованными концентрациями. Во всех этих смесях интервалы для x_e были определены правильно [63].

АМКП вида (4.19) позволяют значительно упростить вычисление аналитических моделей многокомпонентных неаддитивных смесей за счет кусочно-линейных аппроксимаций соответствующих функций, причем область определения этих кусков (интервалов) определяется с помощью АМКП [62-73].

Таблица 4.3.

Обозначения переменных и точек разбиения,
отображающих состав смесей

Переменные	Обозначения	Точки разбиения	
		0 - I	I - 2
I	2	3	4

Концентрации, %:

бензола	x_1	30	40
толуола	x_2	20	30
хлорбензола	x_3	40	50

Оптические плотности (при аналитических позициях, см^{-1}):

907	y_I	0,20	0,30
-----	-------	------	------

продолжение табл. 4.3

I	:	2	:	3	:	4
I005		y_2		0,28		0,33
I027		y_3		0,98		1,15
I032		y_4		0,53		0,59
I040		y_5		0,65		0,75
I083		y_6		1,05		1,15
I087		y_7		1,40		1,60
II27		y_8		0,15		0,35
I380		y_9		0,10		0,20
I450		y_{10}		0,70		0,86
I465		y_{11}		0,38		0,46
I480		y_{12}		1,44		1,55
I500		y_{13}		0,70		0,85
I586		y_{14}		0,80		0,90
I610		y_{15}		0,24		0,31
I817		y_{16}		0,13		0,18
I960		y_{17}		0,19		0,28
2870		y_{18}		0,13		0,23
2922		y_{19}		0,27		0,40
3030		y_{20}		0,95		1,25
3038		y_{21}		1,40		1,60
3070		y_{22}		0,95		1,05
3092		y_{23}		0,93		1,05

4.4. Построение технологической модели

флотации фосфоритной руды

Горно-химические производства в отличие от традиционных производств органических продуктов отличаются малой оснащен-

ностью средствами контроля, большим уровнем помех и значительным изменением качества перерабатываемого сырья, т.е. производство этого вида отличаются значительной информационной неопределенностью. Построение АМКП, в частности, процесса флотации фосфоритной руды представляло бы значительный интерес в данном случае для построения системы управления с переменной структурой [19, 73], поскольку с помощью АМКП можно определить как элементы этой структуры (т.е. K_j), так и множество ограничений (α , β), определяющих области определенных законов управления. При достижении границы (α , β) каждой области происходит переключение на другой закон управления (или на специально выбранный дежурный режим).

Исходный массив данных (96 состояний производства, включающий в сумме 32 входные и выходные величины) был составлен по диспетчерским отчетам (данные были получены Кафтановым А.З.), показания приборов контроля регистрировались каждый час.

Флотация фосфоритной руды заключается в ее измельчении до определенного класса частиц, взвешенных в воде, добавления определенных реагентов и воздуха, пузырьки которого являются транспортирующим агентом — частицы фосфорита адсорбируются на границе жидкость-газ и, таким образом, отделяются от вмещающих пород.

Перед обработкой данных было учтено запаздывание по всем переменным. Выходные переменные Y разбивались по медианам на 2 класса эквивалентности, причем целевые значения Y_1 соответствовали большим значениям содержания P_2O_5 в готовом продукте — фосфоритной муке, а целевые значения Y_2 соответствовали (одновременно) малым значениям содержания MgO в фосфоритной муке. Было решено также ввести в массив входных данных запаздывающие на I час значения выходного вектора, т.е.

$y(t-1)$.

Рассмотрим первую, наиболее значимую импликацию K_I из интервальной формы АМКП 74 :

$$\begin{aligned} & (4,90 < x_{I2}(t) < 5,05) \wedge (82,75 < x_{29}(t) < 86,0) \wedge \\ & \wedge (28,35 < y_I(t-1) < 30,45) \wedge (1,05 < y_2(t-1) < 2,05) \supset \\ & \supset (28,75 < y_I(t) < 30,45) \wedge (1,05 < y_2(t) < 1,85) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Таблица 4.4.

Обозначения переменных (и медиан для y), отображающих процесс флотации фосфорита и вошедших в АМКП

Переменные	:Обозна- :чения : :	Переменные	:Обозна- :чения :(или ме- :дианы)
Расход руды, т/ч	x_2	Расход керосина, т/ч	x_{I8}
Влажность руды, %	x_3	Содержание частиц клас-	
Концентрация жидкого		са $> 0,18$ мм в анион-	
стекла, %	x_{I2}	ном концентрате, %	x_{I9}
Жирность раствора		Расход таллового мыла,	
таллового мыла, %	x_{I4}	(т/ч) 10^2	x_{29}
Расход раствора тал-		Фосфоритная мука:	
лового мыла, $m^3/час$	x_{I6}	содержание P_2O_5 , %	y_I
		медиана для y_I	28,6
		содержание MgO , %	y_2
		медиана для y_2	1,8

Отметим некоторые особенности модели (4.20). Ввиду достаточной сложности цели (большое содержание P_2O_5 и одновременно малое содержание MgO в продукте) найдено лишь 8 состояний, когда наблюдается попадание в область K_I . Другими словами,

на действующем объекте цель управления достигалась лишь с частотой $8/96 = 0,083$, а в остальных случаях система управления находилась в состоянии "поиска цели". Модель (4.20) указывает достаточные условия существования целевого состояния для зарегистрированных X и Y . Для этого прежде всего требуется некоторое приближение к цели - интервалы $Y(t - I)$ включают в себя интервалы $Y(t)$. Однако K_I не дает информации, каким образом должен осуществляться "захват и сопровождение" цели, для этого, по-видимому, требуется анализ других K_j или, при отсутствии таких сведений - обработка новой информации. Далее, после выполнения этого условия, следует задать определенные в модели (4.20) интервалы значений управляющих воздействий x_{12} и x_{29} . Отметим также, что $Y(t - I)$ играет в K_I роль обратной связи между входом X и выходом Y процесса флотации и что в K_I расход дорогостоящего компонента x_{29} уменьшен (максимальные значения x_{29} в X были равны 103,79).

Для выполнения цели управления, возможно, потребуется, судя по модели (4.20), стабилизировать концентрацию жидкого стекла в процессе флотации на уровне примерно 5%. Именно в этом случае растворимый силикат x_{12} способствует снижению содержания MgO и, соответственно, увеличению содержания P_2O_5 в готовом продукте. Напомним, что этот вывод относится лишь к первому элементу (K_I) проектируемой системы управления с переменной структурой.

Для выяснения роли обратной связи была построена по тем же X , Y модель (4.21), не содержащая в исходных массивах $Y(t - I)$, ограничимся здесь также рассмотрением лишь K_I [74]:

$$\begin{aligned}
& (243 < x_2 < 285) \wedge (3,75 < x_3 < 10,3) \wedge (4,21 < x_{14} < 4,80) \wedge \\
& \wedge (16,4 < x_{16} < 20,5) \wedge (0,935 < x_{18} < 1,10) \wedge \\
& \wedge (25,28 < x_{19} < 36,00) \supset (28,60 < y_1 < 31,7) \wedge \\
& \wedge (0,064 < y_2 < 2,0). \quad (4.21)
\end{aligned}$$

Для модели (4.21) цель управления достигалась (в материале обучения) с частотой лишь $5/96 = 0,052$, ликвидация обратной связи $y(t-1)$ ведет здесь к уменьшению частоты "попадания" в цель. Если в модели (4.20) ранг импликации K_I был равен 4, то в модели без обратной связи ранг K_I равен 6, т.е. закон управления стал гораздо сложнее (зависит уже от 6 переменных). Таким образом, введение переменных $y(t-1)$, зависящих от времени, приводит к более устойчивому (см. главу 2) и более простому закону управления (4.20).

На примере моделей (4.20) и (4.21) показан один из возможных способов имитации поведения исследуемого объекта с помощью АМКП. Вместо одноразовой обработки всей исходной информации можно, в соответствии с заранее принятой гипотезой о роли той или иной группы переменных, исключить их из рассмотрения или вводить новые, например, переменные с запаздывающим аргументом. Как уже ранее указывалось, показателями качества АМКП являются оценки $|f_j|$, соответствующие частоте попадания в области K_j , ранги r для K_j , вероятность P_m опознания состояния m исследуемого объекта при обучении на остальных $m-1$ состояниях, степень сжатия (или информационная энтропия) модели, указывающая на общую "зашумленность" данных, возможность качественной и аналитической интерпретации АМКП. Все эти показатели могут быть использованы для выработки решения, какая именно модель более адекватна исследуемому процессу

и более удобна для построения соответствующего управления.

Приведем еще один способ интерпретации модели (4.21). Построим аналитическую (эрмитову) модель, отображающую зависимость от соответствующих шести переменных:

$$y_{Im} = 28,65 + 82,60 x_{2n} x_{3n} x_{14n} x_{16n} x_{19n} e^{x p [(-1/4) \times (x_{2n}^2 + x_{3n}^2 + x_{14n}^2 + x_{16n}^2 + x_{18n}^2 + x_{19n}^2)]}, \quad (4.22)$$

$x \in R_I$; если $x \notin R_I$, то $y_{Im} = 28,65$; $x'_2 = 266$,

$x'_3 = 9,50$, $x'_{14} = 4,51$, $x'_{16} = 20,2$, $x'_{18} = 1,020$,

$x'_{19} = 27,51$

(формулы для вычисления x_n приведены в главе 2).

Исходя из технических характеристик прибора для y_I известно, что ошибка $\delta_{yi} = 0,5$, а значение ошибки для модели (4.22) $\delta_{ym} = 0,3$. Поскольку дальнейшее увеличение числа членов эрмитова ряда $\sum ch$ здесь не имеет смысла, можно ограничиться лишь первым его членом, т.е. моделью (4.22). Итак, эрмитовы модели позволяют выявить существование аналитических свойств у подмножеств R_j и ошибку соответствующих аппроксимаций y_m .

Модель (4.22) отображает лишь y_I , однако множество, аппроксимированное функцией y_{Im} , имеет по построению ограничения (α_i, β_i) , (γ_2, δ_2) , соответствующие малым значениям y_2 . Таким образом, АМКП позволяют весьма просто и естественно конструировать многокритериальные описания типа (4.22), когда к уравнению, отображающему один критерий (функцию) y_I , приписывается условие, что другой критерий y_2 находится при этом в заранее известных границах (γ_2, δ_2) . В этих условиях оптимуму для y_I уже соответствует некоторый интервал целе-

вых значений для y_2 . При разбиении $Y = (y_1, \dots, y_\omega)$ на большее чем 2 число частей происходит сужение целевых интервалов (γ, δ) , включающих в себя и оптимальные значения для U . По-видимому, во многих практически важных случаях использования АМКП будет достаточно получить аналитическое выражение лишь для одного наиболее важного критерия, описывающего соответствующий оптимум, при заранее известном списке ограничений $[(\alpha, \beta), (r, \sigma)] | K_j$, которые удовлетворяют всем ω критериям. Для точного знания оптимума можно использовать любой классический способ оптимизации, применительно к системе уравнений вида (4.22), разрешенных порознь относительно $y_{1m}, \dots, y_{\omega m}$.

Эти модели, содержащие помимо постоянного слагаемого лишь первый член ряда Эрмита, наиболее часто встречаются при исследовании объектов, находящихся в условиях недостатка информации. В этом случае уже заранее известны значения x_{iH} , доставляющие экстремальное значение функции y_m . Как уже ранее отмечалось $x_{iH} = \sqrt{2} (x_i - \inf x_i) : (x_i' - \inf x_i)$, где x_i' — точка, соответствующая экстремуму для y_m , который будет одним и тем же для всех $x_{ij} \in K_j$. Поскольку во всех случаях при движении вдоль кривой y_m найдется такая точка x_i , что ее абсцисса равна x_i' , то выражения в круглых скобках сокращаются и $x_{iH} = \sqrt{2}$. Таким образом, для моделей с одним лишь первым членом эрмитового ряда всегда сразу же известны значения всех x_{iH} , которым соответствует минимум функции y_m в смысле приведенных ранее формул. Это значение $x_{iH} = \sqrt{2}$.

Отметим еще легкость построения (проектирования) динамических систем, т.е. гладких векторных полей на многообразиях K_j , с помощью эрмитовых моделей. Практически для этого достаточно, чтобы в АМКП и, соответственно, в эрмитовы модели

включалось бы в той или иной форме время, например, в виде первых разностей переменных при одинаковой частоте регистрации состояний объекта, функций от запаздывающего аргумента (времени), соответствующего глубине памяти исследуемой подсистемы $K_j \in S$ и т.п. Гладкость полей (дифференцируемость требуемое число раз) здесь всегда обеспечивается самой формой эрмитовых функций.

Однако предметом исследования с помощью АМКП являются системы $S \subset X \times Y$, т.е. собственные подмножества данных. При исследовании достаточно сложных объектов предполагают, что здесь полная информационная определенность $S = X \times Y$ практически недостижима. Такая постоянная ограниченность массивов данных может приводить к отсутствию соответствующих функций времени в АМКП, хотя априорные данные говорят о том, что управление объектом может зависеть от времени (K_{t1}, K_{t2} и т.д.) и, судя по приборным диаграммам, скорости изменения переменных могут быть достаточно гладкими.

Польза АМКП в случае такой информационной неопределенности заключается в том, что ранг K_j может быть увеличен за счет введения в K_j дополнительных переменных (функций времени) из "контекста" АМКП, причем истинность формул K_j при этом сохраняется. Этот прием позволяет, таким образом, частично компенсировать недостаток данных в X, Y .

В заключение отметим следующую полезную интерпретацию определения динамической системы S , приведенного в подразделе 2.4. Семейство функций $\bar{c} = \{c_{tt'} : C \times X_{tt'} \rightarrow C\}$ есть алгоритм построения АМКП, вычисляющий множества $C = \{\alpha, \beta\}$, зависящие от некоторого множества строк X , зарегистрированных на интервале (t, t') . Семейство функций $\bar{\rho} = \{\rho_t : C \times X_t \rightarrow Y_t\}$ есть алгоритм построения эрмитовых

моделей, вычисляющий аналитические функции $\bar{p}$, каждая точка которых зависит от единственного момента t . Таким образом, АМКЛ и ЭМ весьма удачно объясняют и детализируют смысл положений общей теории систем.

Итак, модели (4.20) – (4.22) совместно с приведенной выше их интерпретацией реализуют цель исследования – выявление возможности улучшения технологических характеристик промышленного процесса флотации фосфоритных руд. В частности, модели вида (4.20) и (4.21) отображают требуемые режимы, которые можно или непосредственно реализовать или модели подобного вида могут служить основанием для проектирования более совершенной системы управления процессом флотации фосфоритных руд в условиях информационной неопределенности.

4.5. Построение технологической модели флотации калиевой руды

Процесс флотации калиевой руды подобен вышеописанному процессу флотации фосфорита. Промышленная флотация отличается здесь малой оснащенностью средствами контроля, большим уровнем помех и значительным изменением качества исходного сырья, т.е. производство характеризуется значительной информационной неопределенностью. Как и в подразделе 4.4. основная цель исследования в итоге заключалась здесь в проектировании системы управления с переменной (перестраиваемой) [19, 73] структурой, причем наибольший интерес представляло построение АМКЛ в интервальном виде.

Первоначально исследовался массив данных (получен от ВНИИГ), содержащий 47 переменных и 111 строк, как обычно было учтено запаздывание, обозначения переменных указаны в таблице 4.5, причем отношение веса жидкой фазы к весу твердой фазы

в единичном объеме суспензии обозначалось для краткости как ж/тв и содержание нерастворимого остатка как содержание н.о. Показания приборов регистрировались каждые 30 мин.

Таблица 4.5.

Обозначения переменных и их медиан при
исследовании процесса флотации калиевых руд

Переменные	Обозначения	Медианы
I	2	3
Расход руды, т/ч	x_1	-
Расход аминов, г/т руды	x_2	65,0
Расход тилосы, г/т руды	x_3	1600,0
Содержание частиц диаметром более 0,8 мм в питании флотации, %	x_4	-
Содержание частиц диаметром менее 0,8 мм там же, %	x_5	93,3
Содержание KCl в руде, %	x_6	23,3
Содержание н.о. в руде, %	x_7	-
Ж/тв питания флотации	x_8	2,4
Содержание KCl там же, %	x_9	-
Содержание н.о. там же, %	x_{10}	5,1
Ж/тв концентрата основной флотации	x_{11}	-
Содержание KCl там же, %	x_{12}	76,3
Содержание н.о. там же, %	x_{13}	-
Ж/тв в хвостах флотации	x_{14}	-
Содержание KCl там же, %	x_{15}	2,9
Содержание н.о. там же, %	x_{16}	-
Ж/тв в питании I-й перечистки	x_{17}	4,3
Содержание KCl там же, %	x_{18}	-

I	:	2	:	3
Содержание н.о. там же, %		x ₁₉		-
И/тв в концентрате I-й перечистки		x ₂₀		-
Содержание KCl там же, %		x ₂₁		87,6
И/тв промпродукта I-й перечистки		x ₂₂		-
Содержание KCl там же, %		x ₂₃		7,7
Содержание н.о. там же, %		x ₂₄		-
И/тв в питании 2-й перечистки		x ₂₅		9,6
Содержание KCl там же, %		x ₂₆		74,3
Содержание н.о. там же, %		x ₂₇		-
И/тв в концентрате 2-й перечистки		x ₂₈		-
Содержание KCl там же, %		x ₂₉		91,6
Содержание н.о. там же, %		x ₃₀		-
И/тв промпродукта 2-й перечистки		x ₃₁		-
Содержание KCl там же, %		x ₃₂		28,0
Содержание н.о. там же, %		x ₃₃		-
И/тв в питании 3-й перечистки		x ₃₄		5,6
Содержание KCl там же, %		x ₃₅		-
Содержание н.о. там же, %		x ₃₆		-
И/тв в концентрате 3-й перечистки		x ₃₇		-
Содержание KCl там же, %		x ₃₈		-
Содержание н.о. там же, %		x ₃₉		-
И/тв промпродукта 3-й перечистки		x ₄₀		-
Содержание KCl там же, %		x ₄₁		42,3
Содержание н.о. там же, %		x ₄₂		-
Извлечение, %		x ₄₃		-
Расход пульпы, м ³ /ч		x ₄₄		434,0
Уровень в основной флотации, см		x ₄₅		86,6

I	:	2	:	3
Уровень в I-й перечистке, см		x ₄₆		85,9
Уровень во 2-й перечистке, см		x ₄₇		88,3
Содержание н.о. в концентрате I-й перечистки, %		x ₄₈		-

Выходные переменные в табл.4.5 - это x₁₅, x₁₆, x₃₈, x₃₉, x₄₃. В данном случае они обозначались через x_i для сохранения единой нумерации всех переменных, принятой в исходной таблице.

В начале исследования желательно было выяснить качественные причины увеличения в некоторых технологических ситуациях содержания КСІ в хвостах флотации (причины "проскока" КСІ или причины "аварийных ситуаций"). Поскольку было известно, что по этой же таблице исходных данных была построена модель процесса флотации калийных руд на основании метода главных компонент, из исходной таблицы данных были выбраны лишь те переменные, которые рассматривались в работе [76]. Для этих переменных в табл.4.5. приведены медианы. АМЭП, соответствующая "аварийным" ситуациям, имеет следующий вид (как обычно, в начале модели приведены наиболее значимые K_i):

$$\begin{aligned}
 & x_{25} \bar{x}_3 \bar{x}_{45} \vee \bar{x}_{17} x_{25} x_{29} \vee x_{25} \bar{x}_{32} x_{34} \bar{x}_{45} \vee \bar{x}_{17} x_{23} x_{34} \bar{x}_3 \vee \\
 & \vee x_{10} \bar{x}_8 \bar{x}_{17} x_{21} x_{29} \vee \bar{x}_{26} x_{29} x_{41} \vee \bar{x}_{29} x_2 \bar{x}_{41} \bar{x}_{46} \vee \\
 & \vee \bar{x}_6 x_{10} \bar{x}_{44} \bar{x}_{21} \bar{x}_3 \vee x_8 \bar{x}_{12} x_{25} x_{41} \vee x_6 \bar{x}_{44} \bar{x}_{21} x_{41} \vee \\
 & \vee x_{17} \bar{x}_{32} \bar{x}_{34} \bar{x}_2 \vee \bar{x}_{25} x_3 \bar{x}_{45} \bar{x}_{46} \vee x_6 x_{23} x_{25} \bar{x}_{47} x_{34} \vee \\
 & \vee \bar{x}_5 \bar{x}_{21} x_{34} \bar{x}_3 \supset x_{15}
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

Из K_1 видно, что наиболее частой причиной повышения содержания КСИ в хвостах — это повышенное содержание воды (точнее ж/тв) в питании второй перечистки x_{25} при малой добавке тилозы $\bar{x}_3$ и малом уровне в основной флотации $\bar{x}_{45}$. Частота попадания в эту область была равной 16/111, т.е. около 0,15. Интересный для практики вывод здесь может быть следующий — нежелательное влияние малого расхода тилозы (ценного реагента) проявляется чаще всего в условиях завышенного содержания воды во второй перечистке и при относительно низком уровне в основной флотации. K_2 уточняет предыдущую ситуацию — проскок КСИ опять зависит от x_{25} , одновременно при этом может наблюдаться низкое ж/тв в первой перечистке ($\bar{x}_{17}$) и высокое содержание КСИ в концентрате 2-й перечистки (x_{29}); частота попадания в эту область равна 0,10.

$K_3 = x_{25} \bar{x}_{32} x_{34} \bar{x}_{45}$ уточняет K_1 и K_2 (во всяком случае не противоречит им). Здесь опять наблюдается та же самая зависимость от x_{25} и от $\bar{x}_{45}$, но при низком содержании КСИ в промпродукте второй перечистки и при высоком ж/тв в третьей перечистке (частота этой ситуации была равна 0,09). Ограничимся здесь рассмотрением лишь этих K_i , отметим только, что модель (4.23) в целом обладает большой прогнозирующей способностью — при обучении на 108 строках она опознает три последние строки с вероятностью 0,98.

После построения АМКП в булевой форме (4.23), удобной для качественной интерпретации аварийных ситуаций, было решено по тем же исходным данным построить АМКП в интервальной форме, где вектор выходных переменных ($\bar{x}_{15}, x_{16}, x_{38}, \bar{x}_{39}$) имел бы булевы значения (0110), в этом случае определялись бы условия, при которых наблюдаются малые значения КСИ и большие н.с. в хвостах флотации ($\bar{x}_{15}, x_{16}$) при больших значениях

КСІ и малом н.о. в концентрате 3-й перечистки ($x_{38}, \bar{x}_{39}$). Это исследование носило проектный характер – необходимо было выяснить сложность и пригодность для управления полученной модели. По технологическим соображениям было также решено ввести обратную связь – на вход подать также значения выходных переменных, взятые из предыдущей строки, т.е. $x(t-1)$.

$$\begin{aligned}
 & (1110 \leq x_3(t) \leq 2040) \wedge (2,03 \leq x_{15}(t-1) \leq 3,74) \wedge \\
 & \wedge (3,04 \leq x_{16}(t-1) \leq 5,91) \wedge (3,45 \leq x_{17}(t) \leq 5,33) \wedge \\
 & \wedge (7,18 \leq x_{25}(t) \leq 11,95) \wedge (3,62 \leq x_{34}(t) \leq 6,88) \wedge \\
 & \wedge (91,46 \leq x_{38}(t-1) \leq 94,53) \wedge (0,86 \leq x_{39}(t-1) \leq 1,56) \wedge \\
 & \wedge (83,62 \leq x_{45}(t) \leq 86,95) \wedge (80,5 \leq x_{46}(t) \leq 87,3) \wedge \\
 & \wedge (88,0 \leq x_{47}(t) \leq 89,1) \wedge [(168,0 < x_1(t) \leq 200,2) \vee \\
 & \vee (62 < x_2(t) < 75) \vee (8,2 < x_4(t) \leq 13,2) \vee \\
 & \vee (7,6 < x_4(t) < 8,2)] \supset (x_{15}(t) < 2,9) \wedge \\
 & \wedge (4,8 < x_{16}(t)) \wedge (93,3 < x_{38}(t)) \wedge (x_{39}(t) < 1,23). \quad (4.24)
 \end{aligned}$$

Модель (4.24) строилась следующим образом, который может оказаться интересным при проектировании сложных систем управления. По стандартному алгоритму построения АМКП была найдена довольно простая модель, содержащая импликации первого ранга для переменных, включенных в квадратные скобки в модели (4.24), однако соответствующие интервалы (α, β) оказались слишком узкими для реальных возможностей управления – эти переменные должны были варьироваться в широких пределах. Тогда было решено провести следующие операции. Первоначальные интервалы для

x_1 , x_2 , x_4 постепенно расширялись, поскольку при этом импликации становились ложными, по стандартному алгоритму построения АМКП определялось минимальное количество интервалов для других переменных, с помощью которых импликации становились опять истинными. В итоге модель (4.24) представляет дизъюнкцию расширенных до предела интервалов для управляемых переменных x_1 , x_2 , x_4 . Каждый из интервалов соединяется с помощью логической связки $\wedge$ с остальными интервалами вне квадратных скобок.

В модели (4.24) наибольшей частотой (6/III) обладает импликация, включающая в себя переменную x_2 (расход аминов), на втором месте – импликации, включающие x_4 (содержание частиц, превышающих 0,8 мм в пульпе), для обеих них частота равна 5/III. Здесь отметим интересный факт – для x_4 модель задала два почти сливающихся интервала – выброшенной оказалась лишь точка $x_4 = 8,2$. Этот факт, по-видимому, не имеет физической интерпретации, скорее всего этой точке соответствует ошибочная запись какого-либо значения выходной переменной, которое привело к тому, что булев вектор выходных переменных при $x_4 = 8,2$ не принял целевого значения (0110). Модель (4.24) выявила режим, соответствующий малому расходу аминов, $62 < x_2 < 75$. В этом случае медиана равна 65,0. Таким образом, в интервале $62 < x_2 < 65$ возможны сравнительно экономичные режимы, при которых выполняется цель исследования.

Другая модель была построена по новому массиву данных, содержащему 22 переменные величины и III строк, причем в этом новом массиве был зарегистрирован ряд новых переменных, не учтенных ранее (см. таблицу 4.6). Модель (4.25) строилась тем же способом, что и модель (4.24), дополнительные обозначения приведены в табл. 4.6.

$$\begin{aligned}
& (149 \leq x_I \leq 172,8) \wedge (1613 \leq x_{49} \leq 1665) \wedge (90 \leq x_{50} \leq 111) \wedge \\
& \wedge (1490 \leq x_{51} \leq 1565) \wedge (46 \leq x_{52} \leq 74) \wedge (30 \leq x_{53} \leq 73) \wedge \\
& \wedge (51 \leq x_{54} \leq 141) \wedge (360 \leq x_3 \leq 622) \wedge (26,2 \leq x_2 \leq 76,2) \wedge \\
& \wedge (2,18 \leq x_8 \leq 3,02) \wedge [(25,80 < x_6 < 26,07) \vee \\
& \vee (5,04 < x_7 < 5,44) \vee (93,86 < x'_{38} < 93,94) \vee \\
& \vee (95,11 < x'_{38} < 95,16) \vee (95,55 < x_{38} < 95,75) \vee \\
& \vee (1,18 < x'_{15} < 2,18)] \supset (93,94 < x_{38} < 95,79) \wedge \\
& \wedge (0,50 < x_{39} < 0,65) \wedge (1,15 < x_{15} < 1,93) \wedge \\
& \wedge (2,10 < x_{16} < 2,90). \tag{4.25}
\end{aligned}$$

Для компактности записи в этой модели опущен аргумент t ,
 $x_i = x_i(t)$, $x'_i = x_i(t-1)$.

Таблица 4.6.

Обозначения дополнительных переменных для второго
массива данных по флотации калийных руд

Переменные	Обозначения	Переменные	Обозначения
I	2	3	4
Плотность слива мельницы, г/л	x_{49}	Разгрузка гидросепара- тора, м ³ /ч	x_{52}
Расход маточника в мельницу, м ³ /ч	x_{50}	Расход маточника на первую перемешку, м ³ /ч	x_{53}
Плотность разгрузки гидросепаратора, м ³ /ч	x_{51}	Расход маточника на вторую перемешку, м ³ /ч	x_{54}

В модели (4.25) наибольшей оценкой обладает область K_j , которой соответствует интервал для x_{15} . Таким образом, введение в качестве обратной связи содержания КСИ в хвостах флотации позволяет создать наиболее устойчивое управление и перейти от экономически невыгодных ситуаций ($x'_{15} = 2,18$), когда в хвостах флотации остается сравнительно большое количество КСИ, к более выгодной ситуации ($x_{15} < 1,93$). Интересно сопоставление трех интервалов, содержащих x'_{38} , с интервалом для x_{38} в правой части модели (4.25). В этом случае K_j , соответствующая ($93,86 < x'_{38} < 93,94$) переводит объект полностью из нецелевого в целевое состояние. Роль остальных $K_j | x'_{38}$ сводится здесь к выявлению условий (α_i, β_i), при соблюдении которых возможно поддержание объекта управления в целевом состоянии.

Сопоставим модели (4.23) – (4.25). Выпишем режимы, соответствующие наиболее устойчивой импликации K_I из модели (4.24), включающей в себя расход аминов, и сопоставим с наиболее устойчивой импликацией K_I из модели (4.25). Для получения общих выводов выберем пересечение интервалов для переменных, входящих в формулы (4.24) и (4.25), или полный интервал, если переменная входит лишь в одну из этих формул. Образовавшийся интервал (α'_i, β'_i) проверяется на непротиворечивость с моделью (4.23), в которой зарегистрированы области K_j , попадания в которые следует избегать. В случае противоречивости для управления выбирается (α''_i, β''_i) (или полуинтервал, т.е. ограничение с одной стороны), который не пересекается с запрещенными интервалами и в то же время расположенный наиболее близко к рекомендуемым значениям (α'_i, β'_i).

Приведем теперь итоговый список (α''_i, β''_i) (или полуинтервалов), рекомендуемых для управления, соответствующий переменным, вошедшим хотя бы в одну из моделей (4.23) – (4.25).

Интервалы, соответствующие остальным переменным, можно получить аналогичным образом из контекста этих моделей. Отметим еще, что противоречия для основных импликаций из моделей (4.24) и (4.25) ищутся в модели (4.23) в том порядке, как записаны K_j в этой формуле.

$$\begin{aligned}
 & (149 \leq x_1 \leq 172,8), (62 < x_2 \leq 65), (1600 < x_3 < 2040), \\
 & (x_5 > 93,3), (x_6 > 23,3), (2,4 < x_8 \leq 3,02), (x_{10} < 5,1), \\
 & (x_{12} > 76,3), (2,03 \leq x'_{15} < 2,18), (3,04 \leq x_{16} \leq 5,91), \\
 & (4,3 < x_{17} \leq 5,33), (x_{21} < 87,6), (x_{23} \leq 7,7), \\
 & (7,18 \leq x_{25} \leq 9,6), (x_{26} > 74,3), (x_{29} < 91,6), \\
 & (x_{32} > 28,0), (3,62 \leq x_{34} \leq 5,6), (91,46 \leq x'_{38} \leq 94,53), \\
 & (0,86 \leq x'_{30} \leq 1,56), (x_{41} > 42,8), (x_{44} > 434), \\
 & (86,6 \leq x_{45} \leq 86,95), (85,9 < x_{46} < 87,3), \\
 & (88,3 \leq x_{47} < 89,1), (1613 \leq x_{49} \leq 1665), \\
 & (90 \leq x_{50} \leq 111), (1490 \leq x_{51} \leq 1565), (46 \leq x_{52} \leq 74), \\
 & (30 \leq x_{53} \leq 73), (51 \leq x_{54} \leq 141). \tag{4.26}
 \end{aligned}$$

Список (4.26) интервалов (α_i'', β_i'') , рекомендуемых для управления процессом, соответствует лишь первым, наиболее вероятным областям моделей (4.24) и (4.25). Подобные рекомендации можно получить, используя последующие K_j . Аналогичным образом строятся непротиворечивые выводы при использовании любого числа АМКП; вышеприведенные операции и полученный список (4.26) — лишь пример этому.

Теперь опишем кратко один из возможных способов управления с использованием АМКП, модели (4.23) - (4.25) и список (4.26) конструировались именно с такой целью. Этот способ в наибольшей мере соответствует основной геометрической интерпретации АМКП как совокупности некоторых областей K_j , попадание в которые влечет выполнение цели управления U^2 . Список (4.26) отображает с точки зрения теории управления лишь некоторый идеальный случай, когда все переменные управляемы и, соответственно, нет нужды задавать широкие интервалы (α, β) . В этом случае реализация любого K_j сразу же приводит к реализации одного из возможных вариантов управления, отличающихся лишь своей устойчивостью.

В реальном случае, когда лишь часть x_c управляема, использование АМКП приводит к следующему весьма простому и естественному способу управления. В АМКП присматриваются слева направо, т.е. в порядке $(|I|, \leq)$, список K_j и выбирается K_j , где все неуправляемые переменные могут быть реализованы в момент начала управления. Управляемым x_c придается одно из значений (α_c, β_c) , равное, например, середине интервала или минимальному или максимальному значению x_c , если существуют дополнительные соображения, например, расход ценного реагента и т.п. В том же случае, если в модели, описывающей условия достижения цели не нашлось ни одной K_j , которая может быть реализована, то осуществляется переход к АМКП, описывающей условия невыполнения цели, т.е. в стандартном алгоритме построения АМКП целевые строки и строки сравнения меняются ролями - теперь целевыми становятся строки, ранее бывшие строками сравнения, далее алгоритм выполняется стандартно. Опять список K_j просматривается в порядке

убывания $|\Gamma|$ и выбирается такая область K_j , где все неуправляемые переменные могут быть реализованы в момент начала управления, однако теперь остальным, управляемым переменным, придается значение $x_i \notin (\alpha_i, \beta_i) | Z=0$ (см. главу 3). Эти x_i рекомендуется выбирать из интервалов $(\alpha_i, \beta_i) | Z=1$ как и ранее в порядке $(|\Gamma|, \leq)$, их следует лишь проверять на условие $x_i \notin (\alpha_i, \beta_i) | Z=0$. Режимы управления, конструируемые этим способом, по которому заведомо не выполняются уже известные по АМКП нецелевые ситуации $Z=0$, будем называть дежурными режимами [19]. В этом случае, если такие режимы начинают часто встречаться при реальном управлении объектом, следует рекомендовать переход к построению более сложных АМКП, характеризуемых большим числом переменных x_i и большим числом строк m .

В заключение сопоставим полученные результаты с работами [76, 77], где был использован тот же массив исходных данных. В [76] использован метод главных компонент, основная цель работы заключалась в понижении размерности пространства переменных, в котором представляются результаты и выделение главных компонент для их технологической интерпретации. Так по наиболее существенной компоненте и по соответствующим наиболее значимым нагрузкам переменных был сделан вывод, что x_{15} (см. табл. 4.5) увеличивается, если увеличиваются x_8 , x_2 и x_{45} . Другими словами, основной вывод — это $x_2 x_8 x_{45} \supset x_{15}$. Непосредственная проверка этой импликации по таблице исходных данных (см. прил. 3) показывает, что она выполняется всего лишь в двух случаях, в то время как наиболее значимая импликация в модели (4.23) выполняется в 16-и случаях из III. Таким образом, выводы, получаемые с помощью АМКП оказываются в данном случае более устойчивыми (в смысле определения, приведенного в под-

разделе 2.3.2) по сравнению с выводами, получаемыми с помощью метода главных компонент.

По-видимому, метод главных компонент мало пригоден для качественной интерпретации сложных объектов, однако он полезен для тех целей, для которых он создан – вычисления главных компонент, т.е. новой системы ортогональных координат с меньшей размерностью, что может уменьшить вычислительные трудности регрессионного анализа, проводимого по всей таблице данных без разбиения ее на отдельные подмножества. В работе [77] использован метод группового учета аргументов (МГУА) опять по тому же массиву данных (см. прил.3). В этой работе получены следующие выводы. Увеличение числа строк (наблюдений), взятых для обработки, с 40 до 70 не повышает точности прогноза x_{38} на остальных строках. Наименьшая относительная ошибка прогнозирования x_{38} была равна 1,7% (при различных вариантах построения моделей).

Для сравнения с [77] выберем АМКП (4.24), где вычислены общие интервалы (γ, σ) для целевых переменных. Выберем x_{38} и наиболее устойчивую импликацию K_2 , рекомендованную для управления, пометим точки, которые включаются в область K_2 и выпишем все шесть ($|\Gamma| = 6$) значений, соответствующих x_{38} (см. прил.3). Здесь интервал $(\min x_{38}, \max x_{38}) = (93,50; 94,93)$, относительная ошибка около среднего равна 0,76% вместо наименьшей относительной ошибки 1,7% по МГУА. Дальнейшее увеличение числа строк может здесь резко увеличить ошибку для x_{38} , например, при включении в расчеты строк сравнения, для которых x_{38} относится к нецелевому классу эквивалентности. Заметим, что в случае использования МГУА нужно было использовать более 40 строк массивов данных, прежде чем становится заметной их неоднородность, припятствующая

проведению регрессивного анализа по отношению к этим данным, как к единому целому.

Как уже отмечалось ранее, АМКП отображает одновременно многокритериальную оптимизацию, чего нет в МГУА. Вышеприведенный результат (ошибка относительно среднего для формулы K_2 равна 0,76%) получен из АМКП с минимальным количеством вычислений, без построения полиномиальной (аналитической) модели. Использование же, например, метода эрмитовых моделей позволило бы еще более "сгладить" множества, отображаемые K_2 и получить меньший разброс для x_{38} . Однако в случае модели (4.24) такие операции бесполезны – этот разброс близок к ошибке, с которой измеряется x_{38} в производственных условиях.

Итак, по сравнению с МГУА метод АМКП отличается прежде всего большей "разрешающей" способностью. В этом методе каждый вывод K_j локален, он образуется при сопоставлении с ближайшей окрестностью строк сравнения. Помимо уменьшения влияния медленно изменяющихся ненаблюдаемых (нерегистрируемых) переменных этот прием приводит к расслоению пространства X на отдельные многообразия K_j . При увеличении числа точек в X лишь возрастает сложность АМКП – число импликаций и их ранг. С геометрической точки зрения пространство X подразделяется при этом на более мелкие ячейки K_j , что и соответствует увеличению "разрешающей" способности АМКП.

МГУА, по-видимому, удобен лишь в тех случаях, когда заранее выдвигается гипотеза об отсутствии расслоения пространства X , отображаемого, например, в виде единственного полинома.

4.6. О программной реализации АМКП

Программа построения АМКП (см. прил. 4) реализована Куркиным В.В. (ЛТИ) на машине АСВТ-М-4030. Обобщенная блок-схема программы приведена в приложении 2. В частности, время вычисления АМКП при $n = 36$ и $m = 220$ равно примерно 90 минутам, требуемая память равна 100 килобайтам.

4.7. Оптимизация производства хинола "ЭД" и сравнение интервальной и упрощенной форм АМКП

Хинол "ЭД" используется в шинной промышленности для защиты покрышек от атмосферного или иных видов старения, причем с этой целью используется лишь продукт высшего качества. Суть процесса заключается в конденсации парафенетидина с ацетоном в присутствии катализатора — бензолсульфокислоты. В аппарат, снабженный мешалкой, рубашкой для обогрева и барботером для пропускания паров ацетона, подаются бензолсульфокислота, парафенетидин и ацетон. Реакционную массу разогревают до $165 - 170^{\circ}\text{C}$ при размешивании. После этого через аппарат пропускают пары ацетона до тех пор, пока содержание парафенетидина в реакционной массе снизится до 2% или менее. После продувки реакционной массы инертным газом готовый продукт выдавливают из аппарата в сборник. Содержание парафенетидина в реакционной массе определялось методом бумажной хроматографии, содержание основного вещества в готовом продукте определялось методом потенциометрического титрования раствором хлорной кислоты. Условная вязкость определялась по вискозиметру ВЗ-1 при 45°C (работа производилась совместно с РФ НИОПИК).

Входными переменными, определяющими протекание исследу-

емого процесса, являются соотношения загрузок реагентов и катализатора, подача паров ацетона, расход ацетона, возвращаемого в процесс конденсации, загрузка обратного ацетонового слоя, продолжительность нагрева массы и суммарное время операции. Нестабильность этих переменных является основным источником возмущений для изучаемого процесса. Однако, как показали дальнейшие исследования, основной причиной низкого выхода продукта заданного качества была неизвестность оптимальных интервалов значений существенных (информативных) переменных процесса.

Задача оптимизации производства хинола заключалась в выборе информативных переменных и оптимальных интервалов их значений, определении вида и тесноты логической связи между входными и выходными переменными, периодического пересчета всех определенных характеристик, например, при использовании нового вида сырья, модернизации объекта и т.п. Задача оптимизации процесса требовала также текущей оценки параметров управления, которая бы осуществлялась без изменения вида базовой модели (АМКП).

Данный процесс относится к типу достаточно простых ХТС, для которого неполнота данных, судя по хорошей информационной обеспеченности процесса, была минимальна. Поэтому в данном случае было решено упростить сам алгоритм получения АМКП за счет отказа от упорядочения строк сравнения [78], основной трудоемкой операции, с помощью которой уменьшается влияние на модель всей массы нерегистрируемых переменных. Было решено также отказаться от минимизации числа импликаций K , основной операции, повышающей устойчивость АМКП, поскольку в условиях достаточной информационной обеспеченности каждая из многочисленных неминимизированных $K_{jI} \subset K_j$, где $K_j \subset \text{АМКП}$,

по сути дела несет частичную информацию о контексте для K_j , который может быть полезен для управления процессом. Модель, полученную таким способом, будем называть далее упрощенной формой АМКП.

Отказ от упорядочения строк сравнения соответствует гипотезе независимости строк j между собой, т.е. независимости отдельных режимов (операций) периодического процесса получения хинола. Эта гипотеза позволяет упростить расчет оценки степени адекватности модели объекту – после вычеркивания строки j упрощенная форма должна отличаться от исходной упрощенной формы лишь отсутствием K_j . Поэтому ошибка на вычеркнутой строке j при обучении на $m - 1$ строках возникает здесь лишь в том случае, если $|\Gamma_j| = 1$ и одновременно $\Gamma_j \not\subseteq \Gamma_k$, $\Gamma_j \neq \Gamma_k$; $j, k = 1, 2, \dots, m$.

Для упрощенной формы роль контекста частично выполняют пересечения целевых K_{jI} между собой, которые в итоге образуют n -мерные области K_n . Недостаток этого способа заключается, однако, в том, что области K_n часто не содержат точек X_{j0} . В том случае, когда большинство переменных, отображающих исследуемый объект, являются управляющими и когда все рекомендации K_n по управлению объектом лежат в пределах технологического регламента, этот способ, как показал опыт оптимизации производства хинола, является вполне приемлемым. Можно сказать, что использование рекомендаций K_n соответствует проверке гипотезы независимости тех K_{jI} , которые образуют K_n .

Для решения приведенных ранее задач, связанных с оптимизацией производства хинола, совместно с РФ НИОПиК была разработана система управления этим производством, которая функционирует следующим образом. Информация о значениях переменных

(см. табл. 4.7) накапливается и поступает в ЭВМ "Минск-32", определяется АМКП в булевой упрощенной форме, на ее основе формируются рекомендации по управлению процессом, которые через оператора доводятся до аппаратчика. Рекомендации о необходимых значениях интервалов переменных, управляемых локальными автоматическими средствами регулирования, позволяют определить соответствующие уставки регуляторов. После реализации рекомендаций процесс начинает функционировать в новом режиме. Накапливаемая новая информация используется для адаптации модели.

Для сравнения, наряду с упрощенной формой, в данном процессе испытывалась также и интервальная форма. Блок-схема системы управления процесса получения кинола с помощью интервальной формы показана на рис.4.1. Блок "подпрограмма расчета текущих оценок параметров оптимального управления" соответствует здесь обращению к той части основной программы построения АМКП, которая вычисляет интервалы $(\alpha, \beta)_j$ для строки j . При расчете текущих $(\alpha, \beta)_{m+k}$, где m - общее число строк в X , а $m+k$ - номера строк, для которых $Y_m^c \neq Y^c$, происходит соответствующее сжатие интервалов $(\alpha, \beta)_j$. В том случае, если $(\alpha, \beta)_{m+k} = \emptyset$, строится новая интервальная форма АМКП. При управлении с помощью упрощенной формы необходимость в программе расчета текущих $(\alpha, \beta)_{m+k}$ отсутствует - программа расчета упрощенной формы АМКП обладает сравнительно большим быстродействием.

Сопоставим вкратце упрощенную и интервальную формы АМКП. Для этого воспользуемся таблицей 4.8, в которой для краткости выписаны лишь те строки из X , по которым получена упрощенная булева форма, в данном случае импликации $K_{34} = K_{39} = K_{40}$ с наибольшей оценкой $|\Gamma| = 3$ и с наименьшим рангом [78].

Блок-схема управления процесса получения хинола "ЭД"

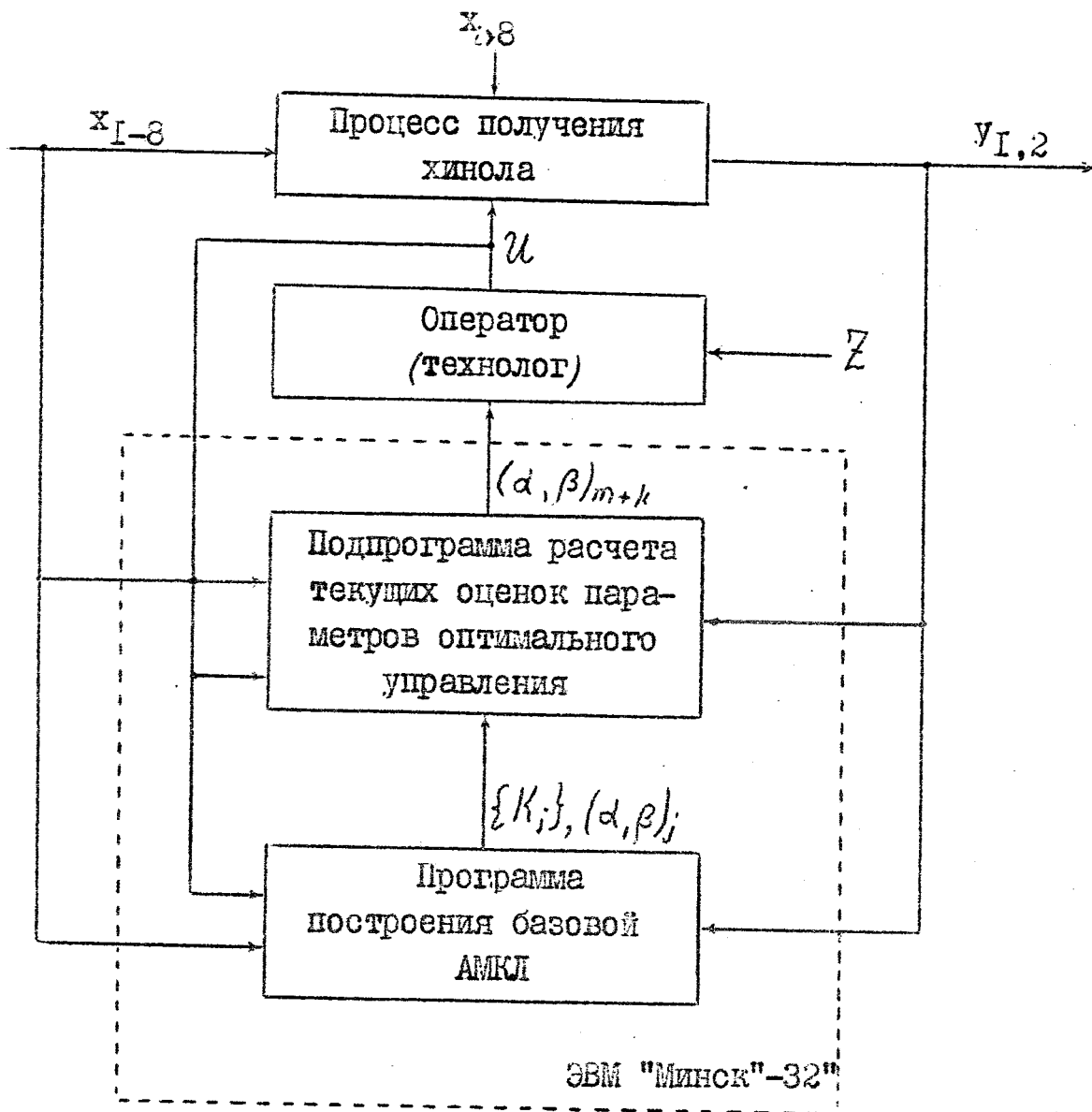


Таблица 4.7.

Обозначения переменных процесса получения хинола "ЭД"

Обозначения :		Переменные
1	:	2
x_1		Загрузка бензолсульфокислоты, кмоль
x_2		Загрузка ацетонового слоя, кмоль
x_3		Загрузка обратного парафенетидина, кмоль
x_4		Общий расход ацетона, кмоль
x_5		Продолжительность нагрева, ч
x_6		Продолжительность дозировки ацетона, ч
x_7		Продолжительность операции, ч
x_8		Скорость подачи ацетона, кмоль/ч
y_1		Условная вязкость продукта, с
y_2		Содержание хинола, %

Для удобства дальнейших сопоставлений запишем эти импликации в интервальном виде (точка в записи числа разделяет часы и минуты):

$$[(x_2 = 0) \vee (0,58 \leq x_2 \leq 1,96)] \wedge (12,45 \leq x_7 < 16,55) \wedge (0,43 \leq x_8 < 0,545) \supset (y_1 \leq 14,5) \wedge (y_2 \geq 74,5). \quad (4.27)$$

Для этих же строк вычислим по общему алгоритму (см. гл.3) интервальную форму:

$$(5,74 < x_4 < 5,93) \vee (6,50 < x_4 < 6,69) \vee (6,88 < x_4 < 7,08) \supset (13,4 \leq y_1 \leq 13,8) \wedge (75,1 \leq y_2 \leq 75,7),$$

$$|\Gamma_{34}| = |\Gamma_{39}| = |\Gamma_{42}| = 1. \quad (4.28)$$

Как видно из модели (4.28), в операциях 34, 39 и 42 качество хинола зависит лишь от общего расхода ацетона в определенных интервалах. Следует заметить, что вообще для интерваль-

Таблица 4.8.

Значения переменных процесса получения кинола "ЭД" в операциях 34, 39 и 42

№ операции	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	y ₁	y ₂
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
34	0,063	0,71	0,039	5,86	2,00	13,00	16,30	0,45	13,4	75,1
39	0,057	0,00	0,000	6,60	3,00	13,55	16,55	0,47	13,5	75,4
42	0,052	0,00	0,000	7,03	1,45	14,00	16,50	0,50	13,8	75,4

ной формы характерны более простые выводы из массивов данных (меньший ранг для K_j) по сравнению с булевой формой АМКП.

Для более детального сопоставления формул (4.27) и (4.28) потребуем теперь, чтобы их оценки были одинаковы. Для этого зададим из формулы (4.28) максимальный интервал для x_4 ($5,74 < x_4 < 7,08$) и воспользуемся далее общим алгоритмом для построения интервальной формы. В окончательной записи модели потребуем также, чтобы вычисленные значения для управляющих переменных находились бы внутри интервалов

$(\min x, \max x) \parallel K_j$ значений этих переменных, реально наблюдавшихся в областях K_j :

$$\begin{aligned} & (0 \leq x_2 \leq 0,71) \wedge (5,86 \leq x_4 \leq 7,03) \wedge (1,45 \leq x_5 \leq 3,00) \wedge \\ & \wedge (0,45 \leq x_8 \leq 0,50) \supset (13,4 \leq y_1 \leq 13,8) \wedge \\ & \wedge (75,1 \leq y_2 \leq 75,7), \quad |I| = 3. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Контекст этой модели включен в сводную таблицу 4.9. Значения переменных, отсутствующих в модели (4.27), взяты из общей упрощенной формы по всем 50 операциям, зарегистрированным на начальном этапе исследования процесса [78].

Из таблицы 4.9 видно, что рекомендации для x_c и значения y_{ω} по интервальной модели (4.29) отличаются большей точностью по сравнению с упрощенной моделью (4.27) и сдвинуты в сторону итоговых рекомендаций для x_c или значений y_{ω} , полученных после трех лет от начала внедрения метода АМКП для оптимизации производства хинкола.

Интервальная форма АМКП требует для своей реализации сравнительно сложного программного обеспечения. Поэтому эту форму следует рекомендовать для реализации АСУТП на уровне сравнительно сложных, многокритериальных ХТС, функционирующих в условиях неполноты данных, когда проблема оптимизации от-

Таблица 4.9.

Рекомендуемые нормы технологического режима и
показатели качества продукта в процессе
получения кинола "ЭД"

Перемен- ные	: По упрощенной : форме (4.27) и : [78]	: По интервальной : форме (4.29) :	: Итоговые, после : трех лет от на- : чала внедрения			
I	:	2	:	3	:	4
x_I		0,045 - 0,064		0,052 - 0,063		0,55
x_2		0 или 0,58 - 1,96		0 - 0,71		0 - 0,60
x_3		0 - 0,090		0 - 0,039		0 - 0,017
x_4		5,74 - 7,50		5,86 - 7,03		7,0 - 8,0
x_5		1.30 - 2.15		1.45 - 3.00		2.30 - 3.15
x_6		12.50 - 14.00		13.00 - 14.00		14.50 - 16.20
x_7		12.45 - 16.55		16.30 - 16.55		17.50 - 20.40
x_8		0,430 - 0,545		0,45 - 0,50		0,47 - 0,51
y_I		$\leq 14,5$		13,4 - 13,8		9,5 - 16,2
y_2		$\geq 74,5$		75,1 - 75,7		74,0 - 77,2

цельных простых процессов решается совместно с другими, связанными с ними проблемами.

Упрощенную форму АМКП следует рекомендовать в тех случаях, когда исследуемые процессы просты, отдельные режимы мало связаны между собой и когда затраты на управление с помощью более сложной интервальной формы представляются слишком большими. Однако, как показало вышеприведенное исследование, в условиях уже имеющегося программного обеспечения, интервальная форма может быть использована, например, на начальном этапе оптимизации простого технологического процесса для ус-

корения вывода его на оптимальный уровень.

Отметим в заключение, что в результате внедрения АСУТП производства хинола "ЭД" с использованием интервальной и упрощенной форм АМКП на Березниковском химзаводе выход продукта высшего качества удалось повысить с 22,8% до 90% и тем самым получить значительный экономический эффект. Таким образом, оптимизация производства хинола в совместных разработках с РФ НИОПиК показала эффективность использования метода АМКП в производственных условиях.

4.8. Выводы к главе 4

1. Выявлены причины, влияющие на содержание воды в метаноле-сырце в промышленных условиях. В частности, указаны теории, согласующиеся как с литературными, так и опытными данными. Показаны конкретные последовательности операций, приводящих к такого рода интерпретации полученных с помощью АМКП выводов, что позволит в дальнейшем улучшить условия автоматизации проектирования соответствующих систем управления.

2. С помощью метода АМКП выявлены условия, приводящие к повышению содержания ацетилена на выходе как отдельного реактора, так и цеха пиролиза природного газа. Посредством АМКП опознаны фрагменты теории газового факела, что также позволит в последующих работах улучшить проектирование системы управления цехом пиролиза.

3. Разработан метод классификации смесей бензола, толуола и хлорбензола по спектрам поглощения.

4. Построена технологическая модель флотации фосфоритной руды в условиях значительной информационной неопределенности процесса. Указана полезность введения обратной связи

в процесс управления на данном объекте. Приведена простая аналитическая модель процесса и способы реализации многокритериального управления.

5. Построена технологическая модель флотации калиевой руды и дана простая технологическая интерпретация причин нежелательных (аварийных) ситуаций на производстве. Дан способ построения АМКП в тех случаях, когда для расширения возможностей управления необходимо расширить диапазоны неуправляемых переменных.

6. АМКП процесса флотации калиевой руды сопоставлена с моделями, полученными с помощью метода главных компонент и метода группового учета аргументов. Указаны причины низкой эффективности последних методов при исследовании объектов, характеризующихся информационной неопределенностью. В данном сопоставлении обнаружена малая устойчивость выводов, соответствующих методу главных компонент, и большая ошибка целевой функции по сравнению с АМКП.

7. Выявлены условия применимости интервальной и упрощенной форм АМКП при оптимизации производства хинола "ЭД".

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод построения алгебраических моделей конструктивной логики (АМКЛ) для сложных объектов, например, ХТС, функционирующих в условиях информационной неопределенности.
2. Существенным для АМКЛ является задание порядковой топологии на множестве ситуаций (состояний объекта), для которых заданная цель не выполняется, причем это упорядочение ведется каждый раз относительно некоторого заранее выбранного целевого состояния.
3. В случае булевых переменных АМКЛ отображается в виде тупиковой дизъюнктивной нормальной формы. Эта форма АМКЛ весьма удобна для качественной интерпретации исследуемого объекта.
4. В случае вещественных переменных АМКЛ отображается в виде дизъюнкции минимального числа областей K , задающих области определения функции U для целевых и, отдельно, для нецелевых значений X (интервальная форма АМКЛ). Эта форма удобна для отображения исследуемого объекта управления в виде системы с переменной структурой.
5. Разработан метод оптимизации ХТС, функционирующих в условиях информационной неопределенности (метод эволюционного планирования с помощью АМКЛ).
6. Предложен метод адаптации системы управления к новым значениям неуправляемых переменных.
7. Предложен простой способ вычисления интервалов значений всех переменных, не включенных в АМКЛ (вычисление "контекста" АМКЛ).

8. Разработан способ вычисления многокритериальных АМКЛ.

9. Разработан метод построения кусочно-линейных по функциям Эрмита моделей, которые аппроксимируют подмножества данных, соответствующих АМКЛ.

10. С помощью АМКЛ получены следующие результаты:

а) выявлены причины, влияющие на содержание воды в метаноле-сырце в промышленных условиях;

б) выявлены условия, приводящие к повышению содержания ацетилена на выходе как отдельного реактора, так и цеха пиролиза природного газа;

в) разработан метод классификации смесей бензола, толуола и хлорбензола по спектрам поглощения;

г) построена технологическая модель флотации фосфоритной руды с учетом обратной связи;

д) построена технологическая модель флотации калийной руды с учетом обратной связи, построена также модель аварийных ситуаций. АМКЛ были сравнены с моделями, полученными с помощью метода главных компонент и метода группового учета аргументов, выявлены явные преимущества АМКЛ.

11. Метод построения АМКЛ внедрен в практику научных разработок нескольких институтов и проектных организаций (Рубежанский филиал НИОПиК, ЛТИ, Украинский заочный политехнический институт, Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт, Шекинский филиал ОКБА и другие). Программа построения АМКЛ передана в отраслевой фонд алгоритмов и программ.

12. Совместно с РФ НИОПиК на Березниковском химическом заводе внедрена автоматизированная система управления технологическим процессом получения хинола "ЭД". Выход продукта

высшей категории качества повысился с 22,8% до 90%, получен экономический эффект 250,4 тысяч рублей и продукту был присвоен Государственный Знак качества.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шенк Г. Обработка концептуальной информации: Пер. с англ./ Под ред. В.М.Брябрина. - М.: Энергия, 1980. - 360 с., ил.
2. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. - М.: Наука, 1979. - 448 с.
3. Хемминг Р.В. Численные методы: Пер. с англ./ Под ред. Р.С.Бутера. - М.: Наука, 1968. - 400 с., ил.
4. Налимов В.В. Теория эксперимента. - М.: Наука, 1971. - 208 с., ил.
5. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. - М.: Статистика, 1974. - 240 с., ил.
6. Sammon H.A. *A nonlinear mapping for Data Structure Analysis.* - *IEEE Trans. Comp.*, 1969, №5, p.401-409.
7. Rao C.R. *The use and interpretation of principal component analysis in applied research.* - *Sankhya(A)*, 1964, №4, p.329-358.
8. Браверман Э.М. Методы экстремальной группировки параметров и задача выделения существенных факторов. - Автоматика и телемеханика. 1970, № 1, с.
9. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. - М.: Советское радио, 1976. - 280 с., ил.
10. Калашников В.В. Качественный анализ поведения сложных систем методом пробных функций. - М.: Наука, 1978. - 248 с., ил.

11. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов. - М.: Наука, 1974. - 696 с.
12. Первозванский А.А., Гайцгори В.Г. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. - М.: Наука, 1979. - 344 с.
13. Хакен Г. Синергетика: Пер. с англ. - М.: Мир, 1980. - 408 с., ил.
14. Юдин Д.Б. Задачи и методы стохастического программирования. - М.: Советское радио, 1979. - 392 с.
15. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. - М.: Советское радио, 1978. - 320 с., ил.
16. Цыпкин Я.З. Адаптивные алгоритмы оптимизации при априорной неопределенности. - Автоматика и телемеханика, 1979, № 6, с. 94 - 108.
17. *Martin R.D., Masreliez C.J. Robust estimation via stochastic approximation, - IEEE Trans. Inform. Theory, 1975, v. IT-21, №3, p. 263-271.*
18. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979. - 288 с., ил.
19. Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. - М.: Наука, 1977. - 416 с.
20. Трапезников В.А. Как повысить эффективность АСУ? - Автоматика и телемеханика, 1979, № 6, с. 21 - 28.
21. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления: Геометрический подход: Пер. с англ. - М.: Наука, 1980. - 376 с.
22. Еремин И.И., Мазуров В.Д. Нестационарные процессы математического программирования. - М.: Наука, 1979. - 288 с., ил.

23. Слэйгл Д. Искусственный интеллект: Пер. с англ. - М.: Мир, 1973. - 320 с., ил.
24. Репин В.Г., Тарковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. - М.: Советское радио, 1977. - 432 с.
25. Cover T. M. *Geometrical and Statistical Properties of System of Linear Inequalities with Application to Pattern Recognition*. - *IEEE Trans. Electronic Computers*, 1965, EC-14, №3, p. 326-334.
26. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Метод потенциалов функций в теории обучения машин. - М.: Наука, 1970. - 384 с., ил.
27. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: Пер. с англ./Под ред. Ю.И. Журавлева. - М.: Мир, 1978. - 415 с., ил.
28. Бухштабер В.М., Маслов В.К. Факторный анализ на многообразиях и проблема выделения признаков в распознавании образов. - Известия АН СССР. Техническая кибернетика, 1975, № 6, с. 194 - 201.
29. Гайцгори В.Г., Первозванский А.А. Об агрегировании линейных систем управления. - Автоматика и телемеханика, 1980, № 8, с. 88 - 95.
30. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука: Пер. с англ. - М.: Мир, 1978. - 424 с., ил.
31. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. - М.: Наука, 1976. - 320 с., ил.
32. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1978. - 400 с., ил.
33. Постников М.М. Введение в теорию Морса. - М.: Наука, 1971. - 568 с., ил.

34. Деллашери К. Емкости и случайные процессы: Пер. с франц./Под ред. Е.Б.Дынкина. - М.: Мир, 1975. - 192 с.
35. *Sierpinski W. Sur la puissance des ensembles mesurables (B). - Fund. Math., 1924, №5, p. 166-171.*
36. Дех Т. Теория множеств и метод форсинга: Пер. с англ./Под ред. В.Н.Гришина. - М.: Мир, 1973. - 152 с.
37. Иблонский С.В. Введение в дискретную математику. - М.: Наука, 1979. - 272 с., ил.
38. Закревский А.Д. Алгоритмы синтеза дискретных автоматов. - М.: Наука, 1971. - 512 с.
39. Автоматизация проектирования сложных логических структур/ Горбатов В.А., Демьянов В.Ф., Кулиев Г.Б. и др. - М.: Энергия, 1978. - 352 с., ил.
40. Горбатов В.А. Семантическая теория проектирования автоматов. - М.: Энергия, 1979. - 264 с., ил.
41. Антосик П., Микусинский Я., Сикорский Р. Теория обобщенных функций: Пер. с англ./Под ред. Е.Д.Соломенцева. - М.: Мир, 1976. - 312 с., ил.
42. Рохлин В.А., Функ Д.Б. Начальный курс топологии. - М.: Наука, 1977. - 488 с.
43. Варден, ван дер Б.Л. Алгебра: Пер. с нем./Под ред. Ю.И.Мерзлякова. - М.: Наука, 1979. - 624 с., ил.
44. Гинзбург С. Математическая теория контекстно-свободных языков: Пер. с англ./Под ред. А.В.Гладкого. - М.: Мир, 1970. - 328 с., ил.
45. Кузин Л.Т. Основы кибернетики: В 2-х т. Т.2. Основы кибернетических моделей. Учеб.пособие для вузов. - М.: Энергия, 1979. - 584 с., ил.
46. Ершов Ю.П., Палютин Е.А. Математическая логика. - М.: Наука, 1979. - 320 с., ил.

47. Интегральные работы /Под ред. Г.Е.Поздняка. - М.: Мир, 1975. - 528 с., ил.
48. Драгалин А.Г. Математический интуиционизм. - М.: Наука, 1979. - 256 с., ил.
49. *Troelstra A.S. Choice sequences: A chapter of intuitionistic mathematics. - Oxford: Clarendon press, 1977. - 170 p.*
50. Клини С., Весли Р. Основания интуиционистской математики с точки зрения теории рекурсивных функций: Пер. с англ. - М.: Наука, 1978. - 272 с.
51. *Bell J.L. Boolean-valued models and independence proofs in set theory. - Oxford: Clarendon press, 1977. - 126 p.*
52. Журавлев Ю.И., Зенкин А.А., Зенкин А.И., Исаев И.В., Кольцов П.П., Кочетков Д.В., Рязанов В.В. Задачи распознавания и классификации со стандартной обучающей информацией. - Ж. вычисл.матем. и матем.физ., 1980, № 5, с. 1294 - 1309.
53. Месарович М., Тахакара Я. Общая теория систем: Математические основы: Пер. с англ./Под ред. С.В.Емельянова. - М.: Мир, 1978. - 312 с.
54. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. - М.: Наука, 1968. - 400 с., ил.
55. *Booc G.E.P. Evolutionary operating: a method for increasing industrial productivity. - Applied Statistic, 1957, № 1, p. 3-23.*
56. Иоффе И.И. Инженерная химия гетерогенного катализа. - Л.: Химия, 1972. - 462 с., ил.
57. Кафаров В.В., Щеглов В.Н., Дорохов И.Н. Моделирование сложных химико-технологических процессов на основе методов алгебры логики. - Докл. АН СССР, 1976, т.231, № 6, с. 1415 - 1418.

58. Щеглов В.Н., Ефанкин Г.А. Применение метода распознавания двоичных кодов для изучения влияния CO_2 на синтез метанола в промышленных условиях. - Хим.пром.Украины, 1970, № I, с. 29 - 31.
59. Шанин Н.А. Об иерархии способов понимания суждений в конструктивной математике. - Труды Матем. ин-та им. В.А.Стеклова, 1973, т.129, с. 203 - 266.
60. Вулис Л.А., Ершин Ш.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. - Л.: Энергия, 1968. - 204 с., ил.
61. Антонов В.Н., Липидус А.С. Производство ацетилена. - М.: Химия, 1970. - 330 с., ил.
62. Щеглов В.Н. Получение булевой модели сложного технологического процесса по текущей информации. - Заводская лаборатория, 1972, № I, с. 56 - 61.
63. Кац М.Д., Щеглов В.Н. Применение булевой алгебры для анализа многокомпонентных смесей по спектрам поглощения. - Заводская лаборатория, 1973, № 3, с. 317 - 323.
64. Кац М.Д., Щеглов В.Н., Югай Г.А. Применение булевой алгебры для анализа многокомпонентных неаддитивных смесей по спектрам поглощения. - В кн.: Тезисы докладов на XIII Всесоюзном съезде по спектроскопии. Минск, 1971, с. 120 - 121.
65. Кац М.Д. Розкин М.Я. О количественном критерии выбора спектральных позиций при анализе многокомпонентных смесей по спектрам поглощения. - Заводская лаборатория, 1972, № 6, с. 688 - 690.
66. Кац М.Д. О выборе аналитических позиций при анализе многокомпонентных смесей по спектрам поглощения. - Заводская лаборатория, 1973, № 2, с. 160 - 163.

67. Кац М.Д. Об абсолютной концентрационной чувствительности спектрофотометрического анализа. - Ж. прикл. спектроскопии, 1972, № 6, с. 1105 - 1107.
68. Кац М.Д. О количественной оценке степени неаддитивности многокомпонентных смесей по спектрам поглощения. - Ж. прикл. спектроскопии, 1973, № 1, с. 151 - 152.
69. Кац М.Д. О выборе оптимальных спектральных позиций при анализе многокомпонентных смесей. - Ж. прикл. спектроскопии, 1973, № 3, с. 508 - 509.
70. Кац М.Д. О повышении точности анализа многокомпонентных смесей по спектрам поглощения за счет выбора оптимальных аналитических позиций. В кн. "Новейшие методы и приборы определения состава веществ в химической промышленности": Тезисы докладов Всесоюзного семинара. М., 1972, с. 43 - 44.
71. Кац М.Д. О решении некоторых методологических проблем обеспечения АСУТП аналитической информацией о составе многокомпонентных смесей. - В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания по автоматизации технологических процессов в химической промышленности. М.: НИИТЭХИМ, 1974, 3 секц., ч. II, с. 115 - 124.
72. Кац М.Д. Методологические проблемы анализа многокомпонентных неаддитивных смесей. - В кн.: Тезисы докладов на II Всесоюзном совещании по аналитическому контролю производств основной химии. Березники, 1975, с. 20 - 21.
73. Трапезников В.А. Как повысить эффективность АСУ? - Автоматика и телемеханика, 1979, № 6, с. 21 - 28.
74. Щеглов В.Н., Сотников В.В. Построение и использование булевых моделей в интервальной форме в химической технологии. - Ленинград, 1980. - 12 с. - Рукопись представлена

- ЛТИ. Деп. в ОНИИТЭХИМ 14 июля 1980, № 680 хп - 80.
75. Щеглов В.Н., Сотников В.В. Построение и использование эрмитовых моделей в химической технологии. - Ленинград, 1980. - 6 с. - Рукопись представлена ЛТИ. Деп. 31 марта 1981, № 291 хп - 81.
76. Андрукович П.Ф., Кобринец В.П., Станишевский В.Н. Применение метода главных компонент при построении математической модели процесса флотации калийных руд. - Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 1975, № 4, с. 104 - 108.
77. Папок Е.В., Дегтярев Л.Д., Кобринец В.П. Применение метода эвристической самоорганизации для математического описания процесса флотации. - В кн.: Обогащение руд. Л., 1979, с 44 - 47. (Научно-технич. реф. бюллетень № 3).
78. Кац М.Д. Исследование в области управления химико-технологическими процессами в статическом режиме. - Дис. ... канд. тех. наук. - Рубежное, 1979. - 172 с.
79. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии: Основы стратегии. - М.: Наука, 1976. - 500 с.
80. Анализ метрологического обеспечения контроля технологического процесса флотации с целью управления реагентным режимом флотации фосфоритных руд (отчет): Тема 78 044 268. Инв. № Б 789423 / Украинский заочный политехнический институт; Кафтанов А.З. - Харьков, 1979. - 333 с.
81. Щеглов В.Н. Разработка и исследование алгебраических моделей конструктивной логики для моделирования динамики химико-технологических систем. - В кн.: Динамика процессов и аппаратов химической технологии: Тезисы Первой Всесоюзной конференции, февраль 1982. Воронеж, 1982, с. 55.

ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА АМКП

Для иллюстрации предложенного алгоритма приведем вычисление одного фрагмента АМКП – импликации K_{27} для массива данных, приведенного в прил.3, для которого были рассчитаны модели 4.23 – 4.25. Решим следующую задачу – определим, например, интервалы изменения переменных, для которых характерны минимальные потери КСИ. Всего таких целевых ситуаций наблюдалось две,

$\min x_{15} = 0,9\%$ КСИ в ситуациях $j_0 = 27$ и $j_0 = 79$. Для иллюстрации вычислим лишь K_{27} , эта целевая строка еще интересна тем, что соседние строки (26 и 28) соответствуют весьма большим потерям КСИ по сравнению со строками 78 и 80, лежащими в окрестности целевой строки 79. Ситуация $j_0 = 27$ важна с точки зрения управления – каким образом на фоне весьма неудовлетворительных значений x_{15} процесс можно вывести на оптимальный по x_{15} уровень.

В приводимых далее вычислениях таблица П.І.І. разбита по числу переменных примерно на две равные части, вторая часть таблицы продолжается на следующей странице. Боковик этой таблицы соответствует упорядоченному списку строк сравнения $j^c < j^*$ кроме значения $j_0 = 27$, относительно которой производятся все вычисления. Как уже указывалось ранее (см. главу 3), вычисления здесь заключаются в определении открытых интервалов (α, β) , которые после сравнений со строками $x_{j^c}, (j^c, \leq)$, могут лишь уменьшаться, превращаясь в итоге в $\emptyset$. В данном примере отображаются лишь существенные особенности процесса получения АМКП в интервальной форме и не отображаются (из-за громоздкости и недостаточной наглядности) некоторые аспекты вычислений, которые более просто выявляются, когда X – массив однозначных

чисел. Соответствующий пример, где выявляются такие аспекты (увеличение ранга для K_{j_0} , способы проверки гипотез и т.д.) был приведен ранее в главе 3. В таблице П.І.І элементы x_{i,j_0} подчеркиваются, если они образуют итоговые границы α , β , которые подчеркиваются. Если $x_{i,22} = x_{i,j_0}$, то результат обозначается символом $\emptyset$.

Из таблицы П.І.І видно, что использование для сравнений системы расширяющихся окрестностей около $j_0 = 27$ приводит к более быстрому удалению несущественных переменных $(\alpha, \beta) = \emptyset$, нежели при сравнении со случайно выбранными строками. Действительно, если бы это удаление происходило равновероятно, т.е. независимо от упорядочения $(j_0, \leq)$, то на первой половине использованных строк сравнения вычеркивалась бы также половина всех удаляемых переменных, в действительности вычеркивается 83%. В ближайшей к $j_0 = 27$ четверти всех строк сравнения вычеркивалась бы также четверть от всех удаляемых переменных, в действительности здесь вычеркивается 67%. На ближайшей восьмой части должно вычеркиваться 12,5%, а в действительности удаляется 58%, т.е. в несколько раз больше, чем при гипотезе равнозначности всех строк сравнения. Таким образом, таблица П.І.І интересна тем, что она иллюстрирует полезность с вычислительной точки зрения использования именно ближайших строк сравнения – удаление несущественных переменных происходит быстрее в несколько раз.

Выпишем итоговые оценки и интервалы (соответствующие границы в табл. П.І.І подчеркнуты):

$$|\Gamma| = 1, \quad 75,6 < x_{12} < 76,2; \quad |\Gamma| = 5, \quad 86,2 < x_{18} < 86,9;$$

$$|\Gamma| = 5, \quad 7,6 < x_{23} < 8,0; \quad |\Gamma| = 2, \quad 9,3 < x_{25} < 9,5;$$

$$|\Gamma| = 6, \quad 81,6 < x_{26} < 85,0; \quad |\Gamma| = 4, \quad 31,8 < x_{32} < 34,9;$$

$$|\Gamma| = 3, \quad 55,6 < x_{40} < 57,9; \quad |\Gamma| = 2, \quad 358 < x_{44} < 378.$$

В данном случае получено 8 импликаций K_{27} первого ранга, которые можно было бы объединить связкой "или". Однако в условиях информационной неопределенности отдаем предпочтение более устойчивой импликации, соответствующей $|\Gamma_{27}| = 6$. Итак, основной вывод из строки $j_0 = 27$ будет следующий:

$81,6 < x_{26} < 85,0; \quad x_{15} \leq 2,9; \quad \Gamma_{27} = \{27, 36, 50, 60, 68, 89\},$
 $|\Gamma_{27}| = 6$, т.е. в том случае, когда содержание КСИ в питании второй перечистки заключено в открытом интервале $(81,6; 85,0)$, то содержание КСИ в хвостах будет меньше или равно 2,9%. Далее по Γ_{27} рассчитывается контекст этого вывода. Вычислим, например, интервалы $[\min x_i, \max x_i]$, которые весьма просто определяются после просмотра строк, соответствующих Γ_{27} :

$22,0 \leq x_6 \leq 27,0$	$87,8 \leq x_{47} \leq 88,9$
$4,6 \leq x_7 \leq 6,8$	$92,2 \leq x_{29} \leq 93,5$
$91,8 \leq x_5 \leq 97,4$	$26,4 \leq x_{32} \leq 44,6$
$2,1 \leq x_8 \leq 3,0$	$4,0 \leq x_{34} \leq 5,5$
$369 \leq x_{44} \leq 524$	$60 \leq x_2 \leq 80$
$75,8 \leq x_{12} \leq 87,2$	$1065 \leq x_3 \leq 2000$
$3,5 \leq x_{17} \leq 5,3$	$83,6 \leq x_{45} \leq 86,8$
$86,8 \leq x_{18} \leq 91,9$	$36,3 \leq x_{40} \leq 70,4$
$7,2 \leq x_{23} \leq 18,2$	$80,5 \leq x_{46} \leq 87,1$
$7,8 \leq x_{25} \leq 9,7$	$0,9 \leq x_{15} \leq 2,9$
$81,7 \leq x_{26} \leq 84,5$	$92,2 \leq x_{38} \leq 95,0 \quad (\text{П.І.І})$

АМКП с контекстом можно записать здесь как импликацию K_{27} , левая часть которой представляет конъюнкцию ранга $= 20$, т.е. замкнутых интервалов для всех входных переменных. Соответ-

ствующие интервалы приведены в списке П.І.І. Правая часть импликации K'_{27} также соответствует замкнутому интервалу. Путем некоторого усложнения расчетов можно построить АМКП, где все интервалы будут открытыми – для этого надо найти ближайшие значения $x_{i,jk} = \alpha, \beta$, которые прилегают слева или справа к вышеприведенным интервалам.

Интересная особенность моделей с контекстом – истинность формул любого ранга при условии, что формула будет включать основную формулу K_{27} :

$$(81,6 < x_{25} < 85,0) \supset (x_{15} \quad 2,9)$$

Эта особенность дает возможность выбора формулы, наиболее приемлемой, например, с точки зрения теории управления, поскольку ограниченные массивы X и Y могут, вообще говоря, и не содержать информации, достаточной для выбора определенного (технологически обусловленного) способа управления.

В данном случае воспользуемся информацией о том, что управляющими будут (см. главу 4) переменные, отображающие расходы основных компонентов процесса флотации, x_1, x_3, x_{44} , содержание частиц класса $< 0,8$ мм, x_5 и все отношения количества жидкой фазы к твердой, $x_8, x_{17}, x_{25}, x_{34}, x_{40}$. В таком случае, обозначая через $\hat{x}$ соответствующие вышеприведенные интервалы, запишем интервальную форму закона управления в следующем кратком виде:

$$\hat{x}_2 \quad \hat{x}_3 \quad \hat{x}_5 \quad \hat{x}_8 \quad \hat{x}_{17} \quad \hat{x}_{25} \quad \hat{x}_{34} \quad \hat{x}_{40} \quad \hat{x}_{44} \supset \hat{x}_{15}. \quad (\text{П.І.2})$$

контекст которого соответствует интервалам остальных переменных (полагаем, что все переменные соединены связкой "и"). Аналитическая форма закона управления может быть получена из модели П.І.2, списка (П.І.І) и массива данных (см. прил. 3) с помощью метода эрмитовых моделей (см. главу 2).

Естественно, модель (П.1.2) истинна лишь в определенном выше контексте. При выходе значений внешних воздействий за пределы этого контекста следует выбирать другие законы управления K , обладающие иным контекстом. При отсутствии таких K управление с помощью АМКП может строиться различными путями, включающими и наиболее общий способ – адаптацию. Здесь же кратко отметим лишь наиболее простой и экономичный с вычислительной точки зрения путь – вычисление по прежнему массиву X АМКП, отображающей "области запрета" – области определения логической функции, для которой цель исследования не выполняется.

В процессе управления при выходе за известные пределы внешних возмущений закон управления (АМКП) сохраняется до тех пор, пока цель управления продолжает выполняться или до тех пор, пока АМКП, рассматриваемая как формула, в которую подставлены значения всех переменных, существующих в момент управления, не совпадет с какой-либо запретной областью. При нарушении этих условий происходит процесс адаптации, т.е. построения новой АМКП. Этот метод управления объектом в условиях информационной неопределенности можно рекомендовать в тех случаях, когда по техническим причинам (недостаточное количество накопленной информации, недостаточная скорость вычислений) построение новой АМКП при каждом новом значении контекста представляется нецелесообразным.

Таблица П.І.І.

Изменение границ α_{ij} , β_{ij} в процессе
определения интервалов (α_i , β_i)

	Номера переменных											
	6	7	5	8	44	12	17	18	23	25	26	47
27	22,0	4,6	95,1	2,1	369	75,8	3,8	80,8	7,9	9,4	84,5	87,8
28	22,6	4,3	90,8	2,4	436	80,0	4,1	92,1	8,2	11,3	80,5	89,2
26	24,6	6,0	88,9	∅	399	76,1	4,8	79,2	6,1	10,7	69,7	∅
25	22,4	5,5	91,2		347	<u>76,0</u>	4,2	83,6	7,2	11,4	56,1	
24	20,9	5,3	89,6		414	73,5	4,3	82,2	6,7	9,1	69,2	
31	23,5	4,3	89,7		400	73,1	5,5	89,9	10,8	13,5	81,0	
23	20,2	6,7	93,1		429	73,6	4,7	83,3	7,1	10,4	66,3	
32	25,2	3,9	89,3		427	83,2	4,1	92,7	13,5	10,7	87,9	
22	21,9	7,5	90,5		442	60,5	5,0	84,1	9,5	9,6	57,3	
21	∅	7,0	92,0		417	66,8	4,0	81,8	33,6	9,1	54,6	
24		4,2	89,8		647	74,9	4,7	91,2	7,4	11,6	80,7	
35		4,7	89,7		449	69,2	5,1	87,4	6,5	9,7	79,9	
19		5,2	93,8		441	68,5	4,5	80,0	4,7	<u>9,3</u>	52,1	
18		4,7	93,3		400	71,5	4,2	83,6	6,4	8,8	76,8	
17		5,3	91,4		347	77,3	∅	<u>86,9</u>	5,2	7,6	72,6	
9		6,3	94,6		331	79,5		89,3	9,4	7,2	<u>81,6</u>	
8		4,9	93,5		404	<u>75,6</u>		83,3	7,2	10,1	64,5	
7		4,5	94,8		465	69,8		80,0	<u>7,6</u>	7,9	49,6	
4		4,7	84,2		428	71,2		90,4	4,3	7,8	72,9	
54		5,5	92,7		452	82,9		88,1	9,2	9,8	71,3	
55		5,3	92,0		414	81,4		89,5	6,8	9,0	73,3	
58		5,7	93,1		476	82,2		90,0	10,4	9,9	73,1	
69		5,8	93,6		497	76,3		<u>86,2</u>	9,5	7,3	72,8	
70		6,4	94,3		418	71,9		85,2	10,8	9,1	75,5	
71		7,3	92,1		494	68,7		82,9	12,7	12,7	65,4	
72		6,9	92,7		431	80,4		89,7	10,6	10,9	78,7	
73		4,9	92,8		486	68,0		86,0	11,5	12,3	68,1	

продолжение таблицы П.І.І

	Номера переменных							
	29	32	34	2	3	45	40	46
27	92,2	32,8	5,5	60	2000	86,2	56,0	86,9
28	∅	31,1	6,4	∅	∅	87,2	50,6	86,7
26		22,5	6,9			85,8	42,9	86,4
25		21,5	8,2			85,5	28,1	86,5
24		16,1	5,9			85,7	30,2	86,4
31		31,6	8,2			87,2	66,5	86,8
23		16,0	6,5			86,5	28,8	86,7
32		41,5	6,2			∅	80,5	87,4
22		15,3	5,6				18,4	86,7
21		15,7	5,4				23,8	84,2
34		38,5	6,9				44,2	86,3
35		30,9	6,6				46,8	86,6
19		14,1	6,5				25,8	87,4
18		28,9	4,9				33,3	86,1
17		20,8	5,3				46,1	88,1
9		48,8	4,1				39,1	∅
8		14,8	5,3				25,1	
7		16,5	4,0				33,9	
4		21,3	4,5				25,5	
54		30,1	5,1				52,7	
55		27,8	5,1				45,2	
58		21,7	∅				31,7	
69		52,8					53,8	
70		37,1					52,2	
71		38,6					46,0	
72		53,6					51,1	
73		27,6					39,7	

продолжение таблицы П.1.1

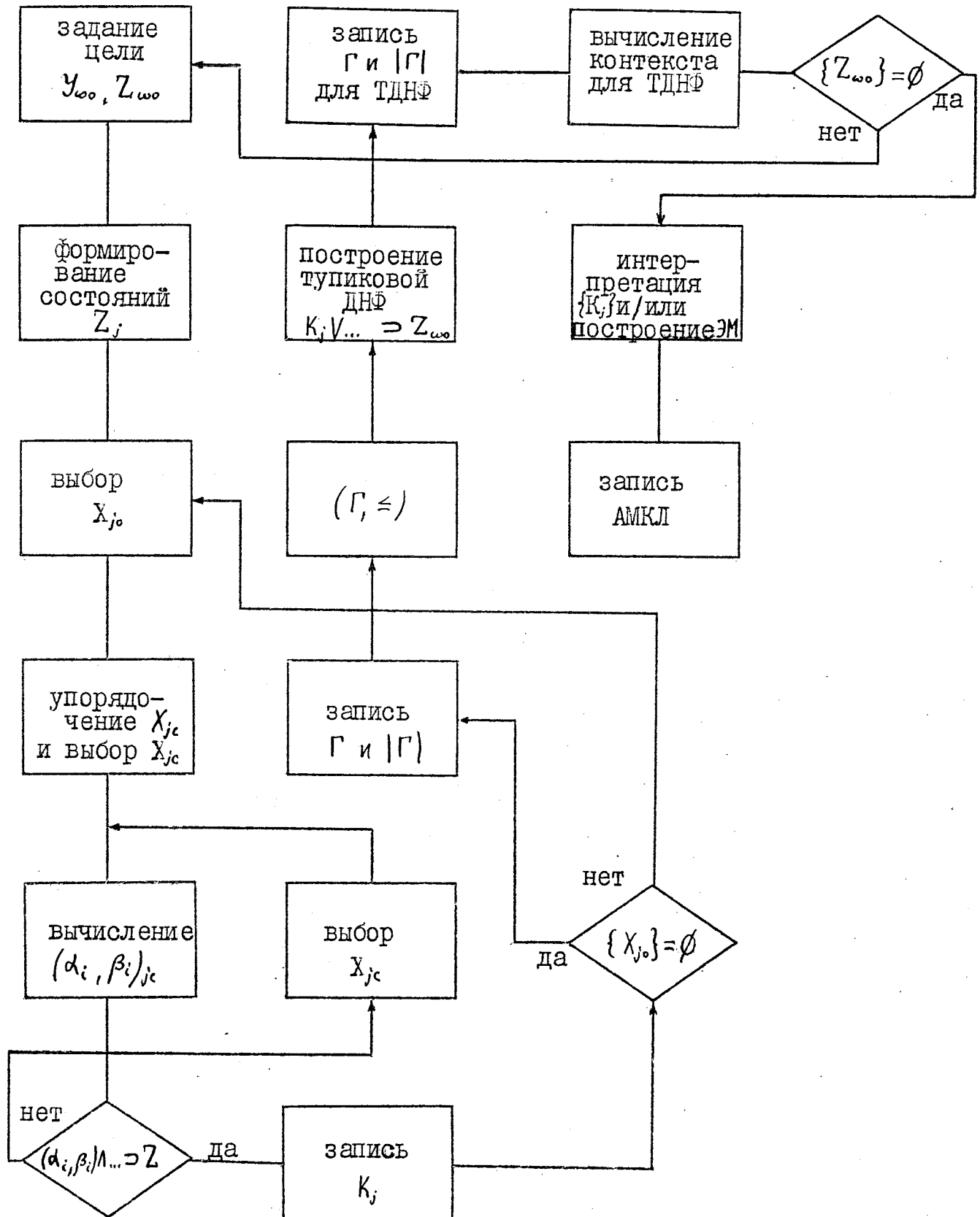
Номера переменных												
	6	7	5	8	44	12	17	18	23	25	26	47
74	5,0	88,9		688	63,6		85,1	9,0	11,0	72,8		
78	6,4	93,4		455	73,2		91,3	9,8	9,9	75,8		
80	4,7	94,0		439	76,9		91,9	11,1	88,6	78,3		
83	5,8	93,8		527	61,4		89,7	13,8	9,8	73,1		
85	4,9	92,7		419	82,2		88,6	14,0	<u>9,5</u>	85,2		
86	5,0	92,3		378	80,4		91,0	43,6	10,9	87,8		
87	4,4	92,8		437	83,1		89,9	8,1	11,7	<u>85,0</u>		
88	∅	93,1		381	76,2		83,5	9,8	10,4	73,1		
90		93,6		439	74,7		88,6	9,6	11,6	73,1		
91		91,2		421	83,0		89,4	11,3	9,7	77,2		
92		93,1		427	75,6		83,8	9,8	14,8	72,8		
93		94,6		463	81,3		90,6	10,6	9,9	72,0		
94		92,8		<u>358</u>	72,5		84,7	3,8	12,0	65,5		
95		92,6		444	78,9		88,2	6,5	11,2	70,0		
96		90,0		408	78,7		87,7	5,3	9,6	73,5		
98		93,3		453	77,5		88,1	6,1	9,7	77,1		
99		91,2		400	76,7		87,5	57,8	9,2	72,6		
100		94,1		464	71,3		88,9	6,2	10,5	67,6		
101		93,6		426	74,7		87,1	7,6	9,7	70,3		
102		94,6		409	76,5		85,5	9,6	9,5	62,3		
103		∅		395	81,2		90,5	49,9	10,0	80,6		
105				374	76,8		82,4	7,6	8,9	78,8		
107				342	76,4		87,2	8,1	10,9	75,1		
108				463	78,3		89,4	<u>8,0</u>	10,3	85,3		
109				527	79,3		87,9	11,2	10,2	86,1		
110				387	71,0		85,8	14,3	12,0	87,2		
111				454	82,3		90,4	9,5	9,8	87,3		

продолжение таблицы П.І.І

	Номера переменных							
	29	32	34	2	3	45	40	46
74		21,2					42,4	
78		22,1					44,8	
80		31,4					42,1	
83		23,6					35,8	
85		45,8					68,9	
86		50,5					74,1	
87		<u>34,9</u>					72,4	
88		20,9					40,3	
90		20,4					54,2	
91		22,6					52,7	
92		20,6					31,1	
93		17,5					<u>57,9</u>	
94		14,8					35,4	
95		18,9					43,8	
96		19,6					33,2	
98		30,3					36,9	
99		31,3					<u>55,6</u>	
100		31,8					37,9	
101		13,2					33,1	
102		20,8					42,6	
103		58,6					49,7	
105		52,4					55,1	
107		24,1					39,0	
108		56,6					52,0	
109		44,0					48,6	
110		45,7					54,1	
III		54,6					78,8	

Приложение 2

Обобщенная блок-схема алгоритма построения АМКЛ



Приложение 3

Значения переменных процесса Флотации калийных руд

	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ											
j	6	7	5	8	44	12	17	18	23	25	26	
I	25,0	5,2	86,8	2,4	424	75,0	3,5	84,6	3,1	8,0	73,6	
2	24,0	5,1	89,1	2,2	412	81,0	3,4	90,1	4,3	11,9	64,9	
3	24,6	4,9	90,1	2,7	443	75,4	3,7	84,2	4,0	8,9	76,2	
4	19,7	4,7	84,2	2,6	428	71,2	4,7	90,4	4,3	7,8	72,9	
5	21,2	4,9	94,0	2,2	381	82,9	3,3	88,2	39,4	4,2	76,2	
6	22,8	4,6	92,9	2,2	187	71,4	6,3	88,8	8,2	12,9	68,7	
7	22,0	4,5	94,8	2,2	465	69,8	4,4	80,0	7,6	7,9	49,6	
8	22,3	4,9	93,5	2,0	404	75,6	4,2	83,3	7,2	10,1	64,5	
9	26,9	6,3	94,6	1,8	331	79,5	3,8	89,3	9,4	7,2	81,6	
10	25,6	5,5	94,9	2,9	448	72,8	4,4	84,1	6,4	9,5	61,2	
11	19,8	4,7	94,2	2,3	378	60,5	3,6	78,5	4,9	10,2	45,8	
12	21,3	6,7	97,2	3,4	462	49,0	6,0	61,5	4,6	10,3	43,0	
13	19,3	5,6	95,4	3,0	503	46,6	4,8	37,7	3,7	7,8	44,0	
14	18,9	5,3	96,8	2,4	277	63,8	5,4	84,3	4,3	7,6	75,7	
15	21,2	4,8	93,4	1,7	426	59,9	3,5	80,3	3,2	6,2	67,9	
16	25,6	4,8	95,2	1,8	229	64,1	4,5	86,3	4,1	7,3	68,0	
17	24,1	5,3	91,4	1,8	347	77,3	3,8	86,9	5,2	7,6	72,6	
18	23,0	4,7	93,3	2,1	400	71,5	4,2	83,63	6,4	8,8	76,8	
19	20,8	5,2	93,8	1,8	341	68,5	4,5	80,0	4,7	9,3	52,1	
20	22,9	4,7	93,2	2,0	356	63,6	4,8	78,2	3,8	12,7	46,7	
21	22,0	7,0	92,0	2,3	417	66,8	4,0	81,8	33,6	9,1	54,6	
22	21,9	7,5	90,5	2,4	442	60,5	5,0	84,1	9,5	9,6	57,3	
23	20,2	6,7	93,1	2,4	429	73,6	4,7	83,3	7,1	10,4	66,3	

продолжение приложения 3

НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ											
j	47	29	32	34	2	3	45	40	46	15	38
1	88,1	90,6	10,4	4,1	57	1300	86,5	28,6	85,5	2,1	94,1
2	88,0	91,4	20,6	6,9	56	2000	86,8	40,6	85,9	2,5	95,9
3	89,5	90,2	11,4	5,6	60	2000	87,2	30,9	86,9	2,1	93,2
4	88,4	90,0	21,3	4,5	60	2000	87,2	25,5	86,2	3,3	93,1
5	88,2	91,4	49,1	4,3	65	2000	87,1	5,7	85,6	1,9	96,3
6	89,1	91,2	27,5	9,5	140	1880	87,2	29,9	86,9	2,2	92,0
7	88,9	88,6	16,5	4,0	50	560	86,5	33,9	87,0	3,9	92,2
8	88,0	90,3	14,8	5,3	58	1070	84,5	25,1	87,1	4,0	92,6
9	88,5	92,6	48,8	4,1	60	2000	87,2	39,1	86,9	3,2	92,6
10	88,1	91,2	11,6	6,3	65	1540	87,2	43,1	87,9	2,1	92,3
11	89,1	85,3	9,2	6,6	60	2000	87,2	18,1	88,5	1,8	91,1
12	88,0	79,5	5,9	6,6	65	2000	87,2	13,2	89,1	2,2	91,6
13	89,1	64,4	4,2	7,9	58	2000	87,2	9,2	89,1	2,4	65,6
14	88,8	93,5	36,4	6,2	96	1760	87,2	31,0	87,0	1,9	94,2
15	89,3	89,9	22,9	3,4	45	981	87,2	22,5	88,5	2,5	92,3
16	88,9	92,1	17,3	5,8	93	2040	86,3	28,0	86,2	2,7	94,0
17	88,5	93,6	20,8	5,3	40	1510	86,2	46,1	88,1	3,1	92,7
18	88,5	92,2	28,9	4,9	61	1110	86,5	33,8	86,1	3,5	91,4
19	88,5	87,5	14,1	6,5	65	1180	86,8	25,8	87,4	3,8	90,3
20	89,1	85,5	12,5	7,8	58	2000	86,8	32,2	87,7	2,4	92,6
21	87,8	87,9	15,7	5,4	41	2000	86,5	23,8	84,2	5,7	91,6
22	88,3	89,8	15,3	5,6	41	2000	86,2	18,4	86,7	7,9	92,8
23	87,8	90,6	16,0	6,5	57	1125	86,5	28,8	86,7	4,4	94,6

Продолжение приложения 3

j	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	6	7	5	18	44	12	17	18	23	25	26
24	20,9	5,3	89,6	2,2	414	73,5	4,3	82,2	6,7	9,1	69,2
25	22,4	5,5	91,2	1,8	347	76,0	4,2	83,6	7,2	11,4	56,1
26	24,6	6,0	88,9	2,1	393	76,1	4,8	79,2	6,1	10,7	69,7
27	22,0	4,6	95,1	2,1	369	75,8	3,8	86,8	7,9	9,4	84,5
28	22,6	4,3	90,8	2,4	436	80,0	4,1	92,2	8,2	11,3	80,5
29	21,7	5,1	90,5	2,5	458	79,6	4,5	86,6	8,7	11,5	74,5
30	23,7	4,2	91,9	2,2	354	74,3	4,6	88,6	7,8	10,8	85,4
31	23,5	4,3	89,7	2,2	406	73,1	5,5	89,9	10,8	13,5	81,0
32	25,1	3,9	89,3	2,6	472	83,2	4,1	92,7	13,5	10,7	87,9
33	23,8	4,8	89,6	2,4	427	71,9	4,8	93,6	7,2	10,2	88,4
34	23,6	4,2	89,8	3,8	647	74,9	4,7	91,2	7,1	11,6	80,7
35	24,3	4,7	89,7	2,8	449	69,2	5,1	87,4	6,5	9,7	79,9
36	24,6	4,7	91,8	3,0	524	77,7	3,9	91,5	14,0	9,4	84,1
37	23,2	4,2	93,4	2,4	400	79,2	3,9	88,0	8,6	7,4	77,0
38	23,3	4,4	92,8	2,4	380	76,7	4,1	88,5	7,9	7,9	79,9
39	23,6	4,2	94,4	2,2	412	68,4	3,8	88,4	8,5	7,4	74,7
40	21,6	4,2	95,3	2,4	415	80,4	4,0	88,3	9,8	10,7	75,2
41	22,0	4,7	92,7	2,9	512	74,9	4,7	87,7	6,1	7,4	77,3
42	21,6	4,8	94,5	2,8	469	60,0	5,4	78,5	7,2	10,3	65,3
43	19,4	4,4	93,6	2,4	475	56,4	5,3	84,5	4,8	8,3	71,6
44	21,9	5,0	93,9	2,5	430	67,9	4,9	85,6	3,8	8,9	73,7
45	21,4	4,6	95,0	2,3	413	76,5	4,2	87,8	6,7	5,4	70,7
46	25,8	5,4	94,6	2,5	366	76,8	4,4	85,4	7,3	6,5	60,0

Продолжение приложения 3

:	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	: 47	: 29	: 32	: 34	: 2	: 3	: 45	: 40	: 46	: 15	: 38
24	87,8	91,5	16,1	5,9	62	1050	85,7	30,2	86,4	3,8	93,1
25	88,6	84,9	21,5	8,2	62	2000	85,5	28,1	86,5	7,7	93,9
26	87,8	92,0	22,5	6,9	61	2000	85,8	42,9	86,4	4,5	94,6
27	87,8	92,2	32,8	5,5	60	2000	86,2	56,0	86,9	0,9	94,4
28	89,2	92,2	31,1	6,4	60	2000	87,2	50,6	86,7	3,7	94,0
29	87,8	92,8	30,6	7,1	60	2000	85,5	43,1	87,1	2,9	94,4
30	88,4	93,7	37,3	6,9	70	2000	87,2	47,7	86,4	1,9	94,4
31	88,3	93,5	31,6	8,2	50	2000	87,2	66,5	86,8	5,7	94,8
32	88,6	93,5	41,5	6,2	48	2000	86,5	80,5	87,4	3,8	94,6
33	89,1	93,7	49,4	6,0	65	2000	87,2	55,6	86,5	2,5	94,9
34	88,6	92,9	38,5	6,9	58	2000	87,2	44,2	86,3	3,0	93,3
35	88,8	93,9	30,9	6,6	60	1500	87,2	46,8	86,6	3,1	94,5
36	88,9	93,5	36,5	5,6	60	1380	86,3	50,5	87,1	2,2	93,5
37	88,2	92,4	48,4	4,5	46	1840	87,0	45,1	87,4	1,6	93,9
38	88,2	92,7	25,7	4,7	70	1580	87,0	44,3	86,3	1,8	94,2
39	88,2	92,7	45,3	4,2	60	1110	86,8	43,5	85,9	2,0	94,0
40	89,2	91,5	84,5	6,8	65	2000	86,7	79,8	86,1	2,0	93,1
41	88,1	91,1	34,4	4,2	56	1350	87,2	42,4	87,0	1,7	93,6
42	88,8	86,8	18,8	6,2	65	1440	87,2	28,4	86,0	2,4	92,6
43	88,3	90,9	32,0	4,5	55	2000	87,2	82,5	86,9	2,9	94,3
44	88,5	91,6	32,0	5,5	65	1440	87,2	30,8	86,1	2,7	92,6
45	88,8	87,4	23,6	6,3	60	1580	86,8	27,7	86,4	2,3	89,7
46	89,7	87,8	19,1	6,6	70	1364	86,9	28,8	86,3	1,6	90,0

Продолжение приложения 3

j	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	6	7	5	8	44	12	17	18	23	25	26
47	23,2	5,2	97,7	2,6	452	71,1	4,6	84,4	7,2	8,5	60,9
48	25,9	5,7	94,4	2,5	428	78,4	4,5	89,5	6,6	7,9	64,8
49	24,4	6,1	96,5	2,7	469	63,9	4,4	89	6,7	7,5	70,6
50	27,0	4,8	97,4	2,3	415	87,2	3,5	91,9	12,4	7,8	81,7
51	24,8	4,8	94,6	2,3	381	84,4	3,9	89,4	7,5	7,2	74,6
52	22,2	4,6	93,6	2,3	419	77,6	5,1	89,4	10,3	9,8	68,1
53	27,0	5,2	95,1	2,6	476	83,2	3,9	87,0	3,9	9,7	72,0
54	22,7	5,5	92,7	2,4	452	82,9	4,2	88,1	9,2	9,8	71,3
55	24,2	5,3	92,0	2,3	414	81,4	4,3	89,5	6,8	9,0	73,3
56	25,9	3,4	92,6	2,4	446	80,7	4,0	89,6	10,7	8,2	75,2
57	23,6	5,3	93,0	2,6	470	76,1	4,1	83,8	7,2	8,0	66,2
58	22,9	5,7	93,1	2,6	476	82,2	4,2	90,0	10,4	9,9	73,1
59	25,7	5,3	92,5	2,4	444	79,7	4,0	86,6	6,1	7,2	76,2
60	23,6	4,1	93,7	2,4	448	82,6	4,0	87,3	4,7	8,0	76,9
61	24,4	5,4	92,4	2,7	489	78,3	4,5	88,1	8,2	7,7	79,6
62	24,6	5,9	92,2	2,5	468	78,6	4,1	90,2	7,2	7,8	81,7
63	25,4	7,0	93,0	2,4	424	83,2	4,4	89,2	7,8	8,9	85,2
64	24,9	4,8	93,2	2,3	392	83,8	4,6	90,2	9,4	10,3	78,2
65	22,3	5,2	92,4	2,3	422	73,4	4,6	88,1	7,7	10,4	72,9
66	23,3	6,0	94,1	2,3	492	68,6	5,0	87,5	6,0	8,6	78,1
67	23,1	5,3	91,8	2,4	446	77,5	4,5	88,8	6,2	10,1	81,0
68	25,5	6,8	92,4	2,7	456	79,2	4,6	90,5	8,8	8,0	83,6
69	24,8	5,8	93,6	2,5	497	76,3	4,4	86,2	9,5	7,3	72,8

Продолжение приложения 3

j	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	47	29	32	34	2	3	45	40	46	15	38
47	89,8	86,2	17,9	7,0	65	II54	87,0	32,3	85,6	2,1	91,5
48	89,1	93,4	28,9	3,6	65	I440	87,0	39,8	87,3	2,0	94,0
49	88,0	92,4	37,7	4,5	65	2000	86,2	37,2	86,0	2,1	94,8
50	88,7	93,1	44,6	4,4	67	I065	85,2	36,3	86,8	2,5	94,1
51	88,3	92,0	18,9	4,4	70	I500	86,2	30,6	86,7	2,3	94,4
52	88,9	90,6	23,4	5,3	60	2000	86,5	30,2	88,5	4,5	91,1
53	88,5	91,5	21,7	5,3	70	2000	85,7	41,2	86,9	2,4	93,6
54	88,2	93,1	30,1	5,1	60	2000	86,0	52,7	86,8	3,2	94,0
55	88,1	93,8	27,8	5,1	72	2000	86,6	45,2	88,1	3,8	95,3
56	88,0	92,1	38,6	4,5	80	2000	86,7	56,7	88,4	2,9	93,8
57	87,9	91,5	20,4	4,3	80	2000	86,7	53,9	86,0	2,5	92,8
58	88,5	92,3	21,7	5,6	78	II10	86,6	31,7	85,8	3,2	94,5
59	88,4	87,4	30,5	4,5	76	2000	86,7	43,8	85,6	2,2	94,3
60	88,2	92,8	38,6	4,2	76	II10	86,7	58,6	85,3	2,8	92,7
61	88,1	91,7	31,0	4,3	76	II10	86,7	49,3	85,3	2,6	95,2
62	88,3	93,5	36,6	4,0	70	II00	86,7	49,0	85,2	2,6	92,2
63	88,8	93,5	31,2	5,0	73	I200	86,7	52,6	85,2	2,6	93,7
64	88,7	92,3	23,9	6,2	78	II08	86,7	42,3	85,5	2,8	93,8
65	88,7	90,2	23,9	6,0	68	I030	86,7	28,3	86,3	2,8	94,8
66	88,2	93,3	31,0	4,9	68	I030	86,7	56,5	85,5	2,5	93,1
67	88,6	92,7	23,6	5,9	62	I300	86,7	41,1	85,5	2,9	93,9
68	88,3	92,7	40,4	4,9	80	I440	86,8	61,7	85,4	2,9	95,0
69	88,3	93,3	53,8	4,9	73	I540	86,9	53,8	85,3	4,3	95,1

Продолжение приложения 3

j	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	6	7	5	8	44	12	17	18	23	25	26
70	24,2	6,4	94,3	2,4	418	71,9	5,4	85,2	10,8	9,1	75,5
71	28,8	7,3	92,1	2,6	494	68,7	5,9	82,9	12,7	12,7	65,4
72	23,9	6,9	92,7	2,4	431	80,4	4,3	89,7	10,6	10,9	78,7
73	22,2	4,9	92,8	2,6	486	68,0	5,3	86,0	11,5	12,3	68,1
74	23,0	5,0	88,9	4,0	688	63,6	3,9	85,1	9,0	11,0	72,8
75	21,7	5,8	93,9	2,7	504	65,6	4,4	83,0	8,2	9,1	74,1
76	22,6	5,4	93,7	2,6	477	62,93	4,5	85,1	7,3	8,7	76,5
77	20,5	4,5	94,1	2,5	457	66,8	4,7	86,7	6,1	8,5	75,7
78	24,6	6,4	93,4	2,5	455	73,2	5,7	91,3	8,9	9,9	75,8
79	21,1	4,4	94,5	2,5	466	76,9	4,6	87,6	11,5	8,2	85,1
80	22,6	4,7	94,0	2,2	439	76,9	3,4	91,9	11,1	8,6	78,3
81	23,3	4,0	92,5	2,2	382	77,6	4,2	90,3	8,5	9,8	73,2
82	24,0	4,7	93,9	2,6	436	76,7	6,2	82,4	8,7	7,9	86,3
83	23,3	5,8	93,8	2,9	527	61,4	5,2	86,1	13,8	9,8	73,1
84	21,8	5,2	93,3	2,8	520	77,3	4,4	86,9	10,0	10,4	71,7
85	23,4	4,9	92,7	2,4	419	82,2	4,3	88,6	14,0	9,5	85,2
86	24,7	5,0	92,3	2,1	378	80,4	4,1	91,0	34,6	10,1	87,8
87	23,9	4,4	92,8	2,2	437	83,1	4,5	89,9	8,1	11,7	85,0
88	22,8	4,6	93,1	2,0	389	76,2	4,6	83,5	9,8	10,4	73,1
89	24,6	5,9	94,5	2,4	451	82,6	5,3	91,3	18,2	9,7	82,2
90	24,0	5,7	93,6	2,5	439	74,7	4,3	88,6	9,6	11,6	73,1
91	22,4	5,3	91,2	2,1	421	83,0	3,7	89,4	11,3	9,7	77,2

Продолжение приложения 3

j	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	47	29	32	34	2	3	45	40	46	15	38
70	88,3	91,7	37,1	6,0	64	1170	86,8	52,2	85,2	4,6	92,2
71	88,4	90,5	38,6	7,3	54	1290	86,8	46,0	85,3	10,7	93,7
72	88,4	92,6	53,6	7,4	57	2000	86,6	51,1	85,3	5,2	93,3
73	88,4	91,7	27,6	7,2	46	588	86,6	39,7	85,3	6,7	92,2
74	88,4	88,8	21,2	6,5	70	1310	86,7	42,4	85,3	3,4	91,5
75	88,3	88,4	22,1	5,5	71	2000	86,8	44,5	85,3	2,1	92,8
76	88,4	90,8	23,7	5,3	75	2000	86,8	41,4	85,3	1,9	92,5
77	88,4	88,8	35,2	5,2	69	2000	86,7	38,4	85,5	2,1	91,7
78	88,3	91,4	22,1	5,3	72	2000	86,4	44,8	85,2	3,9	93,1
79	88,0	90,6	29,8	4,5	68	1085	86,0	65,5	84,9	0,9	93,2
80	88,4	92,9	31,4	5,4	70	2000	84,3	42,1	83,1	3,2	93,7
81	88,6	90,0	37,4	6,0	74	2000	85,5	39,9	85,4	2,2	91,5
82	88,7	93,1	55,7	9,1	84	1720	86,5	46,2	85,8	1,8	93,4
83	87,8	91,1	23,6	5,7	69	2000	86,4	35,8	82,9	3,8	93,0
84	88,4	92,5	39,3	6,5	62	2000	85,7	40,1	84,7	1,8	93,9
85	89,1	92,1	45,8	6,2	62	1200	83,6	68,9	84,4	3,0	94,0
86	88,5	93,4	50,5	5,7	74	1100	82,6	74,1	79,9	3,4	95,1
87	88,3	91,8	34,9	6,2	60	756	82,5	72,4	85,5	5,3	93,2
88	88,1	84,5	20,9	6,2	65	950	83,5	40,3	81,5	3,7	91,3
89	88,0	92,2	26,4	5,4	70	2000	83,6	70,4	80,5	2,5	93,5
90	88,0	89,8	20,4	6,3	74	920	83,8	54,2	82,1	4,8	92,5
91	88,0	93,4	22,6	5,2	70	990	84,7	52,7	82,8	3,1	94,7

Продолжение приложения 3

j	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	6	7	5	8	44	12	17	18	23	25	26
92	22,3	5,9	93,1	2,6	474	75,6	5,9	83,8	9,8	14,8	72,8
93	24,4	7,0	94,6	2,5	463	81,3	4,0	90,6	10,6	9,9	72,0
94	22,5	5,6	92,8	2,0	358	72,5	5,2	84,7	3,8	12,0	65,5
95	23,4	7,0	92,6	2,2	444	78,9	4,3	88,2	6,5	11,2	70,0
96	24,9	6,8	90,0	2,1	408	78,7	4,1	87,7	5,3	9,6	73,5
97	22,3	7,2	91,7	2,4	409	76,7	4,1	88,6	7,2	9,8	65,1
98	22,4	6,4	93,3	2,4	453	77,5	4,0	88,1	6,1	9,7	77,1
99	22,9	5,9	91,2	2,1	400	76,7	4,3	87,5	57,8	9,2	72,6
100	22,5	5,7	94,1	2,6	464	71,3	4,7	88,9	6,2	10,5	67,6
101	22,9	6,4	93,6	2,3	426	74,7	4,5	87,1	7,6	9,7	70,3
102	23,0	6,3	94,6	2,4	409	76,5	4,3	85,5	9,6	9,5	62,3
103	30,8	4,8	95,1	2,1	395	81,2	3,8	90,5	49,9	10,0	80,6
104	26,7	5,3	93,8	2,2	319	80,9	4,7	89,1	7,2	9,6	81,4
105	23,8	4,5	94,4	2,3	274	76,8	5,3	82,4	7,6	8,9	78,8
106	24,0	4,7	95,8	4,8	652	83,0	4,8	89,2	6,8	10,3	85,5
107	26,2	7,3	95,6	2,5	342	76,4	5,1	87,2	8,1	10,9	75,1
108	25,6	5,4	94,8	2,4	463	78,3	4,2	89,4	8,0	10,3	85,3
109	25,0	5,8	96,0	3,0	527	79,3	3,9	87,9	11,2	10,2	86,1
110	25,1	5,1	93,8	2,1	387	71,0	4,9	85,8	14,3	12,0	87,2
111	26,4	5,0	97,3	2,6	454	82,3	4,1	90,4	9,5	9,8	87,3

Продолжение приложения 3

j	НОМЕРА ПЕРЕМЕННЫХ										
	: 47	: 29	: 32	: 34	: 2	: 3	: 45	: 40	: 46	: 15	: 38
92	87,9	87,4	20,6	8,4	38	1026	85,8	31,1	85,9	10,2	91,7
93	87,9	91,8	17,5	5,3	70	2000	83,5	57,9	84,8	5,6	93,2
94	88,1	92,1	14,8	7,1	80	2000	83,5	35,4	85,2	8,6	92,3
95	88,2	90,4	18,9	5,7	65	2000	84,7	43,8	85,2	3,9	92,6
96	88,2	90,3	19,6	5,3	70	2000	85,1	33,2	85,3	4,6	93,5
97	88,2	88,4	17,8	5,2	63	2000	85,4	47,8	85,2	2,3	92,2
98	83,1	91,5	30,3	5,3	73	2000	84,7	36,9	85,2	3,9	93,2
99	88,2	91,6	31,3	5,4	69	2000	85,0	55,6	85,2	4,1	94,3
100	87,8	89,8	31,8	5,8	49	1340	84,7	37,9	85,2	3,1	92,8
101	87,8	89,9	13,2	5,4	67	1120	84,7	33,1	85,2	4,5	93,5
102	87,8	89,2	20,8	5,6	65	1185	84,7	42,6	85,2	3,8	92,8
103	88,9	93,5	58,6	5,7	81	1340	84,7	49,7	80,7	3,3	93,2
104	88,8	92,3	92,2	7,0	104	1450	84,7	49,3	87,3	2,0	93,5
105	87,3	94,8	52,4	8,8	125	2000	85,0	55,1	86,6	3,3	94,9
106	88,1	91,7	26,1	6,6	98	1345	87,1	48,0	86,1	1,7	93,9
107	88,2	91,4	24,1	7,2	94	1770	86,9	39,0	85,1	4,3	91,7
108	88,8	92,6	56,6	5,9	64	1070	86,7	52,0	80,7	4,5	93,9
109	83,8	91,6	44,0	6,0	66	1330	85,8	48,6	83,7	4,4	93,6
110	83,8	92,9	45,7	7,6	66	1150	83,8	54,1	84,5	7,3	94,7
111	89,1	92,1	54,6	5,9	65	760	83,4	78,8	82,3	2,0	93,1