

Б. Б. РОЗИН
В. М. СОКОЛОВ
М. А. ЯГОЛЬНИЦЕР

СТАТИСТИЧЕСКИЕ
МОДЕЛИ
В ЭКОНОМИЧЕСКОМ
АНАЛИЗЕ,
ПЛАНИРОВАНИИ
И УПРАВЛЕНИИ
НЕПРЕРЫВНЫМИ
ПРОИЗВОДСТВАМИ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЭКОНОМИКИ И ОРГАНИЗАЦИИ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Б. Б. РОЗИН В. М. СОКОЛОВ
М. А. ЯГОЛЬНИЦЕР

СТАТИСТИЧЕСКИЕ
МОДЕЛИ
В ЭКОНОМИЧЕСКОМ
АНАЛИЗЕ,
ПЛАНИРОВАНИИ
И УПРАВЛЕНИИ
НЕПРЕРЫВНЫМИ
ПРОИЗВОДСТВАМИ

Ответственный редактор
член-корреспондент АН СССР
В. В. Кулешов



НОВОСИБИРСК
«НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1991

ББК 65.051
Р64

Рецензенты

кандидат экономических наук *Н. М. Журавель*
доктор технических наук *В. И. Котюков*

Утверждено к печати
Институтом экономики
и организации промышленного производства
СО АН СССР

Розин Б. Б. и др.

Р64 Статистические модели в экономическом анализе, планировании и управлении непрерывными производствами/Б. Б. Розин, В. М. Соколов, М. А. Ягольницер.— Новосибирск: Наука, Сиб. отд.-ние, 1991. 255 с. ISBN 5—02—029619—8.

В монографии рассматриваются особенности организации непрерывных производств, методические подходы к описанию производственных процессов, базирующиеся на синтезе идей нормативного и дескриптивного моделирования. Анализируется проблема многокритериальности и согласования системы критериев работы предприятия и его подразделений. Обобщен опыт решения типичных задач: выбора экономически выгодных технологических режимов, оптимизации производственного процесса, совершенствования внутривзаводского хозрасчета и др.

Книга предназначена для статистиков, экономистов и инженерно-технических работников.

Р $\frac{0702000000-009}{042(02)-91}$ 166—91 1 полугодие

ББК 65.051

ISBN 5—02—029619—8

©Издательство «Наука», 1991

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга представляет собой обобщение многолетнего опыта исследований авторов по применению математико-статистических методов в решении комплекса экономических проблем совершенствования непрерывного производства.

Выделение непрерывного производства в особый объект экономико-статистического исследования обусловлено его существенным отличием от производства дискретного типа. В отраслях с непрерывной технологией основные производственные процессы носят аппаратурный физико-химический характер, отличаются высокой материало-, энерго- и фондоемкостью, основные агрегаты и процессы играют определяющую роль в эффективности производства. От показателей работы небольшого числа дорогостоящих и сложных технологических агрегатов зависит экономическая эффективность работы предприятия в целом. Важной особенностью рассматриваемого типа производств является их тесная связь с сырьевой базой. На результаты производственного процесса, либо параметры системы управления им влияет множество факторов, взаимосвязанных между собой, значительная часть из которых имеет стохастическую природу.

В то же время отрасли с непрерывными производственными процессами (черная и цветная металлургия, химическая, нефтехимическая, микробиологическая, пищевая промышленность и др.) играют существенную роль в промышленном производстве, определяя общий уровень развития страны.

Основное содержание работы заключается в разработке методологии и методики экономико-статистического моделирования непрерывных производственных процессов, а также в обобщении накопленного опыта решения типичных прикладных задач.

Монография состоит из двух разделов. Первый раздел посвящен методологическим и методическим проблемам экономико-статистического моделирования непрерывных производств. Здесь рассматриваются особенности организации производственного процесса на предприятиях с последовательной физико-химической переработкой сырья; основные области применения статистических моделей в анализе, планировании и управлении непрерывным производством. Излагаются методические подходы к описанию производственных процессов, базирующиеся на синтезе идей нормативного и дескриптивного моделирования. Анализируется проблема многокритериальности и построения согласованной системы критериев работы предприятия и его подразделений. Рассмотрены информационный и модельный аспекты исследования.

Базой используемого методического подхода к исследованию непрерывных производственных процессов является математико-статистический инструментарий, или, точнее говоря, интенсивно развивающееся в последнее время научное направление, получившее название «анализ данных». Это направление, помимо традиционных методов многомерного статистического анализа, включает и целый ряд методов из других областей прикладной математики (распознавание образов, сплайн-аппроксимация, экспертные оценки и др.). Задача методов анализа данных — построение модели конкретного объекта на основе фактических данных о его функционировании. Эти модели в дальнейшем могут использоваться для анализа, планирования и управления производством.

Однако одних моделей анализа данных для решения различного рода типичных задач планирования и управления производством явно недостаточно. Это обстоятельство побудило авторов ориентироваться на комбинированные модельные комплексы, включающие помимо моделей анализа данных и экономико-математические модели других классов: балансовые, имитационные, оптимизационные и др.

На характер описания математического инструментария оказали влияние два обстоятельства: стремление сделать книгу доступной для широкого круга читателей и ограниченность ее объема. Вследствие этого акцент сделан на методологию и методiku организации исследований и ее иллюстрацию на типичных примерах решения конкретных задач. Детальное описание математического инструментария, за исключением двух слабо освещенных в литературе методов (многомерная классификация и анализ эмпирических

кривых), не проводилось. При необходимости читатель может воспользоваться обширной экономико-математической литературой.

Второй раздел обобщает опыт решения ряда типичных задач анализа, планирования и управления непрерывными производствами. Каждая из описанных в нем задач, во-первых, имеет самостоятельное значение, методика их решения может использоваться на любых предприятиях с непрерывными производственными процессами. Во-вторых, эти задачи иллюстрируют комбинированное использование различных экономико-математических методов для решения конкретных проблем функционирования промышленного объекта. В частности, рассматривается задача выбора экономически выгодных режимов эксплуатации технологических агрегатов и переделов на примере предприятия микробиологической промышленности.

Комплекс задач рассмотрен на примере работы предприятий черной и цветной металлургии. Выделены задачи оптимизации производственного процесса в технологической цепочке последовательной переработки сырья в конечный продукт; совершенствования внутривзаводского хозрасчета; оценки и прогнозирования влияния качества руд на технико-экономические показатели производства; прогнозирования стратегии развития крупного металлургического предприятия.

Работа над текстом распределялась между авторами так: главы 1, 3, 4 — Б. Б. Розин, В. М. Соколов, М. А. Ягольницер;

главы 2, 5, 8 — Б. Б. Розин, М. А. Ягольницер;

главы 6, 7 — В. М. Соколов;

глава 9 — В. А. Караваев, В. М. Соколов.

В исследованиях, послуживших базой для написания отдельных глав, принимали участие Г. Н. Букина, Г. Т. Берсенева, Г. Д. Ковалева (гл. 5); Н. П. Чурляева (гл. 6, 7); Н. П. Ионина, Г. П. Бондаренко (гл. 8); Г. Н. Букина (гл. 9).

Книга рассчитана на экономистов и инженерно-технических работников соответствующих отраслей промышленности. Она также будет полезна студентам и аспирантам экономических вузов и инженерно-экономических факультетов технических вузов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОНОМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глава I

НЕПРЕРЫВНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ОБЪЕКТ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

§ 1. Особенности организации производственного процесса на предприятиях с последовательной физико-химической переработкой сырья

Современное промышленное производство представляет собой сложную многоэлементную и многоструктурную систему. Первичной организационной ячейкой этой системы является промышленное предприятие, непосредственно ведущее производственно-хозяйственную деятельность. В связи с этим одним из важных объектов экономико-статистического исследования является процесс функционирования промышленного предприятия и его подразделений, или, точнее, его свойства, отраженные в величинах основных технико-экономических показателей и факторов, а также во взаимосвязях между ними. Предприятие и его подразделения (цехи, участки, агрегаты и т. д.) могут рассматриваться как производственные системы [Тамм и др., 1987]. Они ограничены в пространстве и во времени, имеют автономное назначение, внутреннюю структуру и ресурсы. Физически подсистемы могут быть реализованы с помощью большого разнообразия технологических аппаратов, механизмов, автоматических линий, людей, транспортных систем и устройств обработки информации. Производственные системы являются открытыми через посредство изменяющихся во времени потоков вещества, энергии и информации между средой и системой. В то же время они находятся в состоянии динамического равновесия. Устойчивость производственных систем поддерживается системой управления. Различаются относительно постоянные сведения о строении и связях производственных систем и сведения об изменяющихся состояниях систем. Первые служат, как правило, основой построения моделей перспектив-

ного планирования и принятия решений, вторые — базой построения моделей оперативного управления.

При проведении технико-экономических исследований на уровне предприятия или его подразделений в основе описания деятельности промышленного объекта лежат как экономические, так и технические (технологические) характеристики производства. При этом работу промышленного объекта удобно рассматривать как процесс преобразования предмета труда в продукт труда. Тогда предприятие можно представить в виде некоего преобразователя различных видов ресурсов в готовую продукцию.

Функционирование промышленного объекта может быть представлено следующей схемой. На вход объекта поступают ресурсы: сырье, топливо и электроэнергия, затраты труда и т. д. При этом часть ресурсов поступает из внешней среды, а другая часть представляет собой использование элементов самого преобразователя — производственных фондов и рабочей силы. На предприятии осуществляется процесс производства, в результате которого на выходе промышленного объекта вновь имеем материальный поток — готовую продукцию. Данный процесс асимметричен, направлен от ресурсов к продукции и, как правило, необратим.

Процессу производства продукции сопутствует процесс изменения состояния самого предприятия (его основных фондов, запасов сырья и полуфабрикатов и т. п.). Таким образом, происходит двойное преобразование: предмета труда — в продукт труда и базисного состояния предприятия на начало исследуемого периода — в конечное.

Все показатели, характеризующие деятельность производственного объекта, могут быть объединены в три группы: входные, условия производственного потребления ресурсов и выходные. Входные показатели определяют величину и структуру затрат ресурсов; условия производственного потребления ресурсов отражают технологические способы производства, природные условия и т. д.; выходные характеризуют результаты производства (объем готовой продукции и ее качество, себестоимость, прибыль, рентабельность и др.).

При технико-экономическом исследовании непрерывный процесс производства на промышленном объекте обычно заменяется набором дискретных актов производства. Для предприятия длительность одного такого дискретного акта обычно может быть равна году, кварталу, месяцу. Для подразделений предприятия величина квантов меньше. Величина кванта для периодических процессов определяется длительностью производственного цикла на том или ином технологи-

ческом агрегате. Вход и выход по схеме преобразователя в этом случае представляют собой накопленные за рассматриваемый период величины, характеристики преобразователя — средние величины за этот же период.

Изучение экономической эффективности использования ресурсов на производственном объекте базируется на двух основных принципах:

выпуск продукции является результатом совокупного действия всех затрат ресурсов;

отдельные свойства как ресурсов, так и результатов производства (а следовательно, и экономические показатели, характеризующие эти свойства) взаимосвязаны.

При таком подходе эффективность производства оценивается в рамках одной из модификаций общей модели «затраты — выпуск» путем сопоставления результатов со всеми затратами.

Обязательным условием при моделировании является учет специфики производства. В данной работе объектом исследования являются предприятия ряда отраслей промышленности, имеющие физико-химический аппаратный характер производственного процесса. К ним относятся предприятия черной и цветной металлургии, химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной, микробиологической и пищевой промышленности, ряда подотраслей промышленности строительных материалов и некоторых других. Кроме того, непрерывные технологии внедряются в отдельные процессы дискретных производств. Распространение непрерывных технологий, увеличение единичной мощности агрегатов и комплексов переработки сырья является одним из основных направлений технического прогресса.

Основой производственного процесса в рассматриваемых отраслях является непрерывная технологическая система [Тамм и др., 1987]. Задача таких систем — превращение свойств материальных и энергетических потоков из исходного состояния в некоторое желаемое состояние. Эти процессы проходят непрерывно или с определенным циклом во времени.

Непрерывная технологическая система — это совокупность технологических аппаратов и узлов, соединяемых потоками вещества и энергии, предназначенная для физико-химического превращения вещества в продукт. Оно сопровождается потреблением или выработкой энергии и обработкой информации.

Производственные процессы в отраслях с непрерывной технологией отличаются высокой материало- и фондоем-

костью, основные технологические процессы протекают в крупных агрегатах аппаратного типа. Имеется ряд принципиальных отличий таких предприятий от предприятий с дискретным производственным циклом, например машиностроительных.

Рассмотрим металлургическое предприятие с полным производственным циклом. Здесь в производственный процесс одновременно вовлекаются большие массы сырых материалов, топлива и полуфабрикатов. Так, годовой грузооборот современного металлургического комбината составляет несколько десятков миллионов тонн. При этом имеет место взаимоувязанность технологических процессов как внутри каждого цеха, так и во всей системе цехов, что требует строгой увязки всех параметров производственного процесса. Дело в том, что многие участки металлургических цехов связаны между собой физико-химическим характером процесса и температурными условиями. Эта связь в ряде случаев распространяется на все цехи металлургического цикла, поскольку продукция цехов предыдущих переделов в виде жидкого или нагретого металла является полуфабрикатом для последующих переделов.

Металлургический поток характеризуется, помимо большого количества входящих в него агрегатов и оборудования, своей «жесткостью». Вследствие этого производственные процессы необходимо строго увязывать во времени, и сокращать интервал между окончанием предыдущих и началом последующих процессов.

Металлургическое производство с точки зрения его организации приближается к конвейерному типу, так как процесс базируется на последовательной связи всех участков — ступеней производственного процесса, а перемещение материалов и полуфабрикатов осуществляется при помощи специальных транспортных средств. Задержка на отдельных рабочих местах конвейера или даже временная его остановка на машиностроительном предприятии приведет к снижению объема производства в размере, пропорциональном времени задержки или остановки конвейера. Нарушение же ритма «металлургического конвейера» может повлечь за собой потери, далеко не пропорциональные потерям времени. Так, например, из-за задержки подачи разливочных агрегатов произойдет задержка выпуска готовой стали, которая может повлечь за собой изменение ее химического состава. В результате сотни тонн металла могут пойти в брак, появляется вероятность аварии на сталеплавильном агрегате. И при меньших по масштабу нарушениях непрерывности техноло-

гического процесса отрицательные последствия печаткой работы участков, стоящих в начале технологической цепочки, бывает часто невозможно исправить на последующих стадиях производства.

Важной особенностью рассматриваемого типа производств является их тесная связь с сырьевой базой — месторождениями полезных ископаемых, их природными особенностями, а также развитием и размещением добывающих предприятий. Могут иметь место нарушения в снабжении сырьем; состав и качество сырья, например железной руды, очень различаются на разных предприятиях. В то же время с увеличением размеров технологических агрегатов эффективность их работы достигается, как правило, в случае выполнения повышенных требований, предъявляемых к продукции предыдущих переделов. А. Ф. Мырцымов отмечает, что в черной металлургии «чем крупнее и высокопроизводительнее становятся основные металлургические агрегаты, тем больше сокращаются допустимые диапазоны колебаний свойств перерабатываемых материалов, требуемые для обеспечения бесперебойной и эффективной работы этих агрегатов» [Мырцымов, 1978].

В производствах с непрерывным циклом основной технологического процесса является физико-химическое превращение одного вещества в другое. Это обуславливает одну из существенных особенностей непрерывного производства, которую применительно к собственно химическому производству охарактеризовал К. Маркс: «...различие между главным материалом и вспомогательным материалом исчезает, потому что ни один из применяемых сырых материалов не является вновь в качестве субстанции продукта»*.

Технологически металлургические, химические и другие подобные производства представляют совокупность взаимосвязанных процессов, в которых перерабатываемое сырье претерпевает качественные и количественные изменения, превращаясь в конечную продукцию. В непрерывных производственных процессах поступающие в аппарат реагенты взаимодействуют друг с другом, причем работа аппарата не прекращается при загрузке новых порций реагентов и удалении продуктов реакции. В периодических процессах отдельные стадии производства представляют собой четко определенный цикл, начинающийся с загрузки материалов и кончающийся выгрузкой продукции. При смешанном производстве непрерывные процессы сочетаются с периоди-

ческими. Основным требованием, предъявляемым ко всем стадиям производства, является единство ритма их работы.

Все операции, образующие производственный процесс, могут быть разделены на две основные группы [Кантарджян и др., 1987]. К первой относятся физико-механические процессы: измельчение, перемешивание, сушка и т. д., ко второй — физико-химические процессы, являющиеся основой производства: окисление, биосинтез, полимеризация и т. д. Конечно, такое деление несколько условно, но оно полезно с точки зрения эконоомико-статистического моделирования.

Вторая группа технологических процессов (физико-химические операции) в рассматриваемых отраслях основана на реакциях между жидкими, газообразными, сыпучими и в большинстве случаев агрессивными, ядовитыми и взрывоопасными веществами. Эти процессы осуществляются преимущественно в аппаратах (агрегатах, печах, ваннах) путем воздействия на предмет труда тепловой, электрической, химической или другого вида энергии и отличаются многообразием и сложностью взаимодействия реагирующих веществ.

При ведении процесса происходит, как правило, несколько последовательных и параллельных реакций основных веществ между собой и с примесями, содержащимися в основном сырье, а также с промежуточными и конечными продуктами. В результате химических превращений образуются конечные и побочные продукты и отходы. В целом химическая технология позволяет обеспечить комплексную переработку сырья и рационально использовать все содержащиеся в нем компоненты (более подробно см. § 3 настоящей главы).

Химических производственных процессов, не сопровождающихся другими процессами, почти не существует. Как правило, собственно химические процессы происходят одновременно с тепловыми, механическими, физическими. Для каждой стадии технологического процесса и для производства в целом существует широкий интервал варьирования переменными параметрами процесса.

Роль рабочего органа машины, воздействующего на предмет труда в системе типовых технологических агрегатов, выполняет химическая реакция. Поэтому в отличие от обычной машины работу химических аппаратов во многом определяют передаточные и регулирующие устройства. Конструкция аппарата должна быть такой, чтобы реагирующая масса предохранялась от воздействия внешней среды.

Специфика химических (биохимических) методов воздействия на предмет труда заключается в том, что при их осуществлении время производства, как правило, больше

* Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 23. С. 193.

времени процессов труда. Разница обусловлена тем, что в течение некоторого времени производственный процесс продолжается благодаря воздействию на предмет труда химических процессов, без дальнейшего приложения живого труда.

В заводских условиях химические процессы не являются идеальными и сопровождаются потерями вследствие наличия примесей в сырье и недоиспользования части сырья. Имеются резервы как улучшения использования сырья, так и интенсификации производственных процессов путем поддержания значений параметров процесса на уровне, обеспечивающем требуемое количество и качество продукции, рационального ведения процесса, обеспечения сохранности оборудования.

На предприятиях с дискретным производственным циклом сырье и полупродукты, как правило, превращаются в готовый продукт путем механической обработки. При этом большинство технологических параметров строго ограничено допусками (размер и конфигурация детали, ее вес и т. д.). В непрерывных и периодических производствах технологические параметры могут изменяться в значительно больших пределах. При этом отклонение одного из них даже на сравнительно большую величину может компенсироваться целенаправленным отклонением другого параметра.

Номенклатура входных и выходных продуктов на предприятиях с непрерывным производственным циклом сравнительно невелика и обычно находится в пределах нескольких десятков наименований (в черной металлургии это справедливо для сталеплавильного производства). На современном машиностроительном предприятии ассортимент выпускаемой продукции может составлять тысячи различных изделий.

Для непрерывных производств основные технологические параметры обязательно войдут в информационные потоки, которые определяют величину основных технико-экономических показателей деятельности предприятия; для дискретных производств это условие необязательно, технологическая и экономическая информация там может сосуществовать параллельно. Так, для предприятий металлургической, цементной и химической промышленности качество готового продукта является одновременно и технологическим, и экономическим параметром. Для машиностроительного завода такой фактор, как качество обработки деталей, являясь основным технологическим параметром, не является непосредственно экономическим параметром и только косвенно влияет на основные экономические характеристики работы предприятия.

§ 2. Задачи и объекты экономико-статистического моделирования

Экономико-статистическая модель (ЭСМ) — одна из форм экономико-математических моделей. Она строится на основе обобщения большого эмпирического материала, предназначена для раскрытия закономерностей, проявляющихся в совокупности явлений, и включает элементы неопределенности. Наиболее специфическая черта ЭСМ состоит в том, что она выступает как средство описания стохастических связей и закономерностей, возникающих под воздействием множества причин и следствий в массовых, повторяющихся явлениях.

Статистическая модель функционирования объекта обычно состоит из уравнений и неравенств, параметры которых оценены методами математической статистики. Наиболее часто такую ЭСМ составляют регрессионные уравнения (одно или несколько) и комплекс вспомогательных статистических характеристик (средние, дисперсии, коэффициенты корреляции, оценки точности и аппроксимации и т. д.). Используются и другие формы экономико-статистических моделей (например, классификационные, дискретно-непрерывные).

В организации экономико-статистического исследования выделяются следующие этапы: экономическая постановка задачи, выбор и построение рационального типа модели, анализ и экономическая интерпретация результатов, разработка предложений по использованию модели.

Постановка задачи заключается в определении общих путей и методов реализации поставленной цели, для чего должен быть выбран способ формирования совокупности данных, набор переменных, включаемых в анализ, приемы статистического анализа и моделирования.

Выбор типа модели для описания анализируемого процесса — один из наиболее важных моментов экономико-статистического исследования. Он должен осуществляться с учетом общих требований к статистической модели и специфических условий конкретного исследования. К общим требованиям следует отнести:

наиболее полное отображение реальной структуры исследуемой совокупности объектов в соответствии с принципом структурного подобия;

максимальное использование информации, содержащейся в исходных данных;

максимально возможную простоту модели, обеспечивающую решение задачи с достаточной точностью.

Эти общие требования к типу модели зачастую оказываются противоречивыми, и тогда следует искать наиболее приемлемое решение.

Специфичны для каждого конкретного исследования назначение будущей модели, набор признаков в описании объекта, объем исследуемой совокупности и т. п.

Наконец, укажем еще одно обстоятельство, влияющее на выбор типа модели, — это возможности имеющихся в распоряжении исследователя алгоритмов, программ и вычислительной техники.

Построение математической модели — формальный этап, если задача поставлена, подготовлена необходимая информация, определены тип и форма модели, выбран алгоритм. Наиболее сложным на этом этапе представляется выбор подходящего алгоритма построения модели. В его основе лежат как содержательные, так и организационные соображения. К первым относится выбор алгоритма, обеспечивающего достаточную точность модели, ко вторым — возможность его реализации (наличие программы, соответствующей ЭВМ, трудоемкость подготовки и обработки информации и т. д.). Выбор алгоритма существенно зависит также от типа решаемой статистической задачи и от назначения модели.

Анализ и интерпретация результатов — полностью неформальный и один из наиболее сложных и ответственных этапов. Интерпретация результатов полностью зависит от профессиональных и математических знаний исследователя. Единственное жесткое ограничение заключается в том, что интерпретация должна согласовываться с первоначально выдвинутыми гипотезами. Если такого согласования нет, первичные гипотезы меняются и задача решается с самого начала.

Статистическая модель, даже самая совершенная, не способна охватить, выразить или отразить явления и процессы во всем их диалектическом единстве и многообразии. Любая модель представляет реальное явление только в упрощенном виде и отражает наиболее важные (с точки зрения целей исследования) характеристики и связи.

Интерпретация и применение экономико-статистической модели всегда будут содержать элемент риска (если относительно неучтенных факторов можно сделать объективные вероятностные суждения) или неопределенности (если вероятности не могут быть определены).

Из опыта исследований и логики процесса конструирования ЭСМ следует, что этап постановки задачи является решающим, так как именно здесь формулируется ее сущность

и определяются пути решения. Следует отметить, что это утверждение относится не только к статистическим исследованиям, поскольку постановка и формализация задачи на языке и в форме, допускающей ее решение с помощью математического аппарата, очень часто влечет за собой механическое решение.

Однако постановка задачи гораздо труднее поддается методическим обобщениям, чем решение. Основной путь — это систематизация опыта прикладных исследований.

Можно выделить два аспекта постановки задачи — экономический и формальный. Однако нельзя представлять дело таким образом, что сначала осуществляется экономическая постановка задачи, а затем на ее основе и в полном соответствии с ней — формальная. Это два тесно связанных аспекта одной проблемы, они дополняют и уточняют друг друга. Делить их можно только условно в целях методического удобства.

К вопросам экономической постановки задач относятся формулировка целей исследования, выбор переменных, решение вопроса об измерителях факторов и источниках первичной информации, разработка теоретических предположений и т. д. Их решение базируется на логических положениях прикладных наук, материалах предыдущих исследований, обобщении практического опыта исследователей и производственников. Полученные на этом этапе результаты не будут окончательными, они носят характер гипотез, которые должны уточняться в ходе решения задачи. Необходимость этого уточнения вызывается рядом обстоятельств.

Во-первых, внутренняя логика производственного процесса, которая является базой для профессиональной постановки задачи, полностью не известна. Существенность и характер связей отдельных факторов часто выясняются лишь в результате статистического анализа. Во-вторых, должны быть учтены возможности получения информации и соответствующие им затраты. При этом следует соизмерять эффект от уточнения ЭСМ с величиной затрат на ее построение.

Наконец, существенны ограничения, связанные с матемико-статистическим аспектом исследования. Экономические и математические требования к ЭСМ часто не совпадают. Необходимо найти компромиссное решение, приспособить экономическую постановку задачи к возможностям математического аппарата и вычислительной техники. В наибольшей степени это положение относится к определению числа включаемых в модель переменных и способу описания объекта исследования.

Подходы к экономико-статистическому моделированию непрерывных производств базируются на обобщении их свойств и особенностей, обуславливающих необходимость и целесообразность выделения непрерывных технологических систем в особый объект моделирования. Наиболее общие закономерности, подлежащие учету при моделировании непрерывного производства, сводятся к следующему.

1. На результаты производственного процесса либо параметры системы управления им влияет множество взаимосвязанных факторов, часть из которых имеет стохастическую природу.

2. Результативные показатели процесса характеризуются целым рядом значений, оптимальные величины которых могут быть достигнуты зачастую противоположными действиями в системе управления процессом.

3. Любая локальная система является частью какой-то большей системы, которая выступает в качестве окружающей среды для данной системы и оказывает на нее значительное влияние, диктуя в ряде случаев направления развития подсистемы.

В свою очередь, непрерывные технологические системы, являющиеся основой непрерывного производственного процесса, с точки зрения моделирования характеризуются следующими свойствами [Тамм и др., 1987]:

непрерывная технологическая схема обладает определенной структурой. Потоки вещества и энергии в системе являются входами и выходами различных подсистем и одновременно элементами внешней по отношению к непрерывной технологической схеме среды; в системе возможны возвраты и обратные потоки;

процессы в непрерывных технологических схемах частично наблюдаемы — состояние потоков может характеризоваться как непосредственными наблюдениями, так и опосредованными, косвенными измерениями;

процессы преобразования вещества и энергии в непрерывных технологических схемах в определенной мере управляемы путем влияния на распределение потоков и на режим их преобразования в элементах;

процессы в непрерывных технологических схемах могут изменяться в результате влияния внешних или внутренних неуправляемых факторов, определяющих свойства потоков и элементов;

при исследовании непрерывных технологических схем большое значение имеют законы сохранения вещества и энергии (материальные и энергетические балансы), при этом

потоки вещества являются многокомпонентными, и в некоторых элементах системы компоненты могут взаимно превращаться. Поэтому в общем случае масса компонентов может не сохраняться;

процессы в непрерывных технологических схемах характеризуются ориентированностью (направленностью).

Остановимся более подробно на вероятностных, стохастических свойствах непрерывных технологических схем, подлежащих учету при моделировании. Технико-экономические показатели непрерывного производства зависят не только от основных закономерностей, присущих вообще любым физико-химическим процессам, но также от различного рода «шумов» и волевых действий, величина и направление которых не всегда заранее известны. Наиболее ощутимое влияние оказывает профессиональная подготовка человека, управляющего процессом. Чем меньше его опыт и квалификация, тем больше будет вноситься в технологию производства возмущений случайного характера.

Присутствуют и другого рода помехи — резкие изменения температуры воздуха, наличие не отмеченных заводскими лаборантами примесей в сырье и полуфабрикатах, поставка не отвечающего стандартам топлива и т. д.

Причины, обуславливающие вероятностный характер дискретных и непрерывных производственных процессов, различны. В дискретном производстве технологический процесс разбивается во времени на отдельные этапы, дробится между отдельными исполнителями, использующими различные технические средства. Технологические операции характеризуются как детерминированные (в пределах необходимой для практики точности это относится к подавляющему большинству операций), а вероятностный характер совокупного производственного процесса вытекает главным образом из случайных нарушений в области его организации. Поэтому для дискретных производств, в особенности многоименных, практически невозможно установить непосредственные зависимости между параметрами большого числа разнородных технологических процессов и обобщенными экономическими показателями, — как вследствие разности задач, так и из-за очень большого влияния организационных факторов, непрерывно изменяющихся во времени.

В непрерывном же производстве эффект определяется прежде всего и главным образом течением самого технологического процесса, характеризующими его параметрами, причем между этими параметрами и обобщенными экономическими показателями можно установить непосредственную зави-

Подходы к экономико-статистическому моделированию непрерывных производств базируются на обобщении их свойств и особенностей, обуславливающих необходимость и целесообразность выделения непрерывных технологических систем в особый объект моделирования. Наиболее общие закономерности, подлежащие учету при моделировании непрерывного производства, сводятся к следующему.

1. На результаты производственного процесса либо параметры системы управления им влияет множество взаимосвязанных факторов, часть из которых имеет стохастическую природу.

2. Результативные показатели процесса характеризуются целым рядом значений, оптимальные величины которых могут быть достигнуты зачастую противоположными действиями в системе управления процессом.

3. Любая локальная система является частью какой-то большей системы, которая выступает в качестве окружающей среды для данной системы и оказывает на нее значительное влияние, диктуя в ряде случаев направления развития подсистемы.

В свою очередь, непрерывные технологические системы, являющиеся основой непрерывного производственного процесса, с точки зрения моделирования характеризуются следующими свойствами [Тамм и др., 1987]:

непрерывная технологическая схема обладает определенной структурой. Потоки вещества и энергии в системе являются входами и выходами различных подсистем и одновременно элементами внешней по отношению к непрерывной технологической схеме среды; в системе возможны возвраты и обратные потоки;

процессы в непрерывных технологических схемах частично наблюдаемы — состояние потоков может характеризоваться как непосредственными наблюдениями, так и опосредованными, косвенными измерениями;

процессы преобразования вещества и энергии в непрерывных технологических схемах в определенной мере управляемы путем влияния на распределение потоков и на режим их преобразования в элементах;

процессы в непрерывных технологических схемах могут изменяться в результате влияния внешних или внутренних неуправляемых факторов, определяющих свойства потоков и элементов;

при исследовании непрерывных технологических схем большое значение имеют законы сохранения вещества и энергии (материальные и энергетические балансы), при этом

потоки вещества являются многокомпонентными, и в некоторых элементах системы компоненты могут взаимно превращаться. Поэтому в общем случае масса компонентов может не сохраняться;

процессы в непрерывных технологических схемах характеризуются ориентированностью (направленностью).

Остановимся более подробно на вероятностных, стохастических свойствах непрерывных технологических схем, подлежащих учету при моделировании. Техничко-экономические показатели непрерывного производства зависят не только от основных закономерностей, присущих вообще любым физико-химическим процессам, но также от различного рода «шумов» и волевых действий, величина и направление которых не всегда заранее известны. Наиболее ощутимое влияние оказывает профессиональная подготовка человека, управляющего процессом. Чем меньше его опыт и квалификация, тем больше будет вноситься в технологию производства возмущений случайного характера.

Присутствуют и другого рода помехи — резкие изменения температуры воздуха, наличие не отмеченных заводскими лаборантами примесей в сырье и полуфабрикатах, поставка не отвечающего стандартам топлива и т. д.

Причины, обуславливающие вероятностный характер дискретных и непрерывных производственных процессов, различны. В дискретном производстве технологический процесс разбивается во времени на отдельные этапы, дробится между отдельными исполнителями, использующими различные технические средства. Технологические операции характеризуются как детерминированные (в пределах необходимой для практики точности это относится к подавляющему большинству операций), а вероятностный характер совокупного производственного процесса вытекает главным образом из случайных нарушений в области его организации. Поэтому для дискретных производств, в особенности многоименклатурных, практически невозможно установить непосредственные зависимости между параметрами большого числа разнородных технологических процессов и обобщенными экономическими показателями, — как вследствие размерности задач, так и из-за очень большого влияния организационных факторов, непрерывно изменяющихся во времени.

В непрерывном же производстве эффект определяется прежде всего и главным образом течением самого технологического процесса, характеризующими его параметрами, причем между этими параметрами и обобщенными экономическими показателями можно установить непосредственную зави-

Качественный состав руд цветных металлов [Использование..., 1975]

Основные типы рудного сырья	Ценные компоненты		Доля сопутствующих компонентов в суммарной ценности сырья, %
	Ведущие	Сопутствующие	
Алюминиевая подотрасль			
Бокситы	Глинозем	Галлий, ванадий	15
Нефелины		Натрий, калий, галлий, кремний	28
Алуниты		Натрий, калий, кремний, сера, галлий, ванадий	44
Свинцово-цинковая подотрасль			
Полиметаллические руды	Свинец, цинк, медь	Сера, кадмий, золото, серебро, индий, теллур, галлий, германий, висмут, сурьма, кобальт, барий, ртуть, селен	38
Медная подотрасль			
Медные руды	Медь	Сера, золото, серебро, кадмий, рений, селен, теллур	44
Медно-цинковые руды	Медь, цинк	Сера, золото, серебро, кадмий, селен, теллур, индий, германий, таллий	50
Медно-молибденовые руды	Медь	Молибден, сера, золото, серебро, рений, селен, теллур, кадмий	45
Никель-кобальтовая подотрасль			
Окисленные руды	Никель	Кобальт	24
Сульфидные медно-никелевые руды	Никель, медь	Кобальт, сера, платина, палладий, рутений, осмий, иридий, золото, серебро, селен, теллур	24

Экономические результаты деятельности предприятий с непрерывным производственным циклом, в частности металлургических, во многом определяются качеством минерального сырья и технологией его переработки. Это обстоятельство следует учитывать при моделировании производственного процесса.

Значительная часть металлургических предприятий организована в форме комбинатов, включающих горные, обогащательные, металлургические и химические производства. Таким образом, составной частью комбинатов (горно-металлургических и горно-обогатительных) являются подразделения, непосредственно занимающиеся разработкой месторождений полезных ископаемых. Специализированные металлургические предприятия не имеют горного производства, но показатели их производственно-хозяйственной деятельности также зачастую зависят от качества сырьевой базы.

Характерной особенностью руд, в первую очередь цветных и редких металлов, является наличие в них многих полезных компонентов. Комплексное использование сырья имеет большое значение для обеспечения народного хозяйства необходимой продукцией. Так, основные цветные металлы производятся не только из собственных руд, но и из руд других металлов, где они содержатся в ограниченном количестве. Например, медь извлекается из полиметаллических (свинцово-цинковых), никель-кобальтовых, молибденовых, оловянных руд; вольфрам — из комплексных молибденовых, оловянных, редкометалльных руд и т. д. Из руд цветных металлов извлекаются драгоценные металлы. Целый ряд редких и рассеянных элементов получают как попутную продукцию в результате комплексной переработки сырья цветной металлургии. За счет комплексного использования сырья цветная металлургия удовлетворяет значительную часть потребностей страны в серной кислоте, производит химическую продукцию, строительные материалы.

Из комплексных руд цветных металлов извлекаются основные цветные металлы, минералы которых являются рудообразующими; основные цветные металлы, являющиеся попутчиками в данных рудах; драгоценные металлы; редкие металлы; рассеянные элементы; нерудные минералы. Все эти компоненты отличаются друг от друга по стоимости, концентрации в рудах, по потребности в них. В зависимости от народнохозяйственного значения полезные компоненты обычно делятся на основные, удельный вес которых в промышленной ценности руды составляет свыше 50 %, и попут-

ные, удельный вес каждого из которых невелик, но в сумме может достигать 25—30 % и более промышленной ценности (табл. 1.1).

В последние годы наметились тенденции ухудшения технико-экономических показателей работы предприятий, эксплуатирующих месторождения полезных ископаемых. Так, в цветной металлургии происходит переход к использованию бедных, труднообогатимых, нетрадиционных руд. Повышаются требования к охране окружающей среды. При

Возможные направления использования отходов

Отрасли, производящие отходы	Продукция из отходов			
	топлива	энергии	черных металлов	цветных металлов
Угольная промышленность	Уголь из отвалов; метан из шахт	Газификация отвалов	Железо из пирита	Алюминий, глинозем, алюминий-кремниевые сплавы
Теплоэнергетика	Горючая масса из золы	Утилизация тепла энергоустановок	Железо-кремниевые сплавы из золы	Алюминий-кремниевые сплавы из золы; германий, галлий, молибден
Черная металлургия		Утилизация тепла металлургических печей	Железо из окисленных кварцитов	Ванадий, кобальт, медь, никель, титан, цирконий, цинк, магний, барий, тантал, ниобий и др.
Цветная металлургия	Автогенное сжигание сульфидов	Утилизация тепла металлургических печей	Железо из пирита, пирротина, титаномагнетита	Извлечение металлов из старых отвалов, шлаков, хвостохранилищ, осадков, стоков
Производство минеральных удобрений (горная химия)			Магнетит, титаномагнетит, перовскит	Редкие земли, флюорит, алюминий из нефелина, титан, магний
Производство строительных материалов			Магнетит и железо при обогащении песков	Титан, редкие земли при переработке песков
Атомная энергетика		Утилизация тепла установок	Железо, марганец	Золото, медь, цинк, свинец

этом стало ясно, что традиционно применяемый ранее путь решения экологических задач — строительство очистных сооружений — в принципе не решает полностью проблемы защиты биосферы от вредного воздействия промышленного производства.

Как отмечает Ю. А. Чернегов [1987], при работе очистных сооружений происходит лишь перенос вредных выбросов из одной природной среды в другую, менее чувствительную к данному виду выброса: например, очистка воздуха от

в смежных отраслях [Ласкорин и др., 1984]

для производства

удобрений и продуктов основной химии	стройматериалов	сырья для атомной энергетики	других видов использования
Известкователи почв; серная кислота из пирита	Аглопорит, щебень, кирпич		Закладка шахт; дорожное строительство
Серная кислота из отходящих газов; микроудобрения	Щебень, золотравий, аглопорит, кирпич	Уран, торий	Дорожное строительство
Фосфорные удобрения	Щебень, шлакобетон, цемент, огнеупоры, песок, известь		Дорожное строительство, засыпка оврагов, закладка шахт, ирригационное строительство
Серная кислота, микроудобрения	Щебень, шлакобетон, цемент, огнеупоры, песок, известь	Уран, торий, литий, бериллий	Закладка шахт
Фосфор из хвостов обогащения, содопродукты из нефелина, удобрения из отходов обогащения	То же	Уран, литий из рاسبолов, торий	Закладка шахт
Известкователи почв, улучшение структуры почв, адсорбенты влаги в почве	»		Закладка шахт и карьеров, дорожное строительство, ирригационные сооружения
Микроудобрения, фосфорные удобрения, серная кислота	»	Доизвлечение урана, тория из отходов	Закладка шахт

содержащихся в нем твердых частиц и их складирование в земле. Кроме того, существующие очистные сооружения не всегда обеспечивают эффективную очистку выбросов, а повышение степени очистки приводит к значительному удорожанию газоочистных и пылеулавливающих установок. Таким образом, даже большие вложения в очистные сооружения могут дать незначительный эффект в области охраны окружающей среды, значительно увеличивая в то же время капитальные и текущие затраты на производство продукции.

В постановлении ЦК КПСС и СМ СССР «О коренной перестройке дела охраны природы в стране» отмечалось, что «...проводимая работа по улучшению природопользования слабо базируется на достижениях научно-технического прогресса. Крайне недостаточно внедряются малоотходные и безотходные технологические процессы, комбинированные производства, обеспечивающие полное, комплексное использование природных ресурсов, сырья и материалов».

Безотходные и малоотходные технологии добычи и переработки минерального сырья предполагают максимальное извлечение всех ценных компонентов. На основе межотраслевой кооперации возможно получение из добытой руды, кроме основного компонента, еще целого ряда продуктов (см. табл. 1.2).

Остановимся подробнее на возможностях комплексного использования сырья в цветной металлургии. До получения товарного металла сырье проходит множество стадий переработки, которые можно сгруппировать в три крупных передела — добыча руды, обогащение и металлургия, объединяющие металлургические и химические процессы и рафинирование. Каждой из этих трех групп присущи свои особенности комплексного использования сырья [Виноградов, 1978]. При добыче руды они заключаются, главным образом, в переработке вскрышных пустых пород, а также в использовании залежей полезных ископаемых, расположенных в непосредственной близости друг от друга на разных уровнях, что позволяет эксплуатировать одни и те же горные выработки для отработки руд и пород разных полезных компонентов. Наибольшее значение на горных предприятиях имеет применение вскрышных пород. Обычно они употребляются в качестве строительных материалов. Комплексный характер руд не оказывает влияния на технологию и организацию отработки месторождения: оно ведется в соответствии с проектом в контуре промышленных рудных тел.

На обогатительных фабриках планируется проведение специальных операций, направленных на обеспечение комплексной переработки нескольких полезных компонентов, содержащихся в сырье (получение медного, свинцового, цинкового и других концентратов). Для извлечения полезных компонентов, не образующих собственные концентраты, на обогатительных фабриках, чаще всего не предусматривается специальных технологических процессов, исключения делаются только для драгоценных металлов. Таким образом, процесс обогащения существенно влияет на извлечение ограниченного количества полезных компонентов, как

правило, основных. Попутные компоненты распределяются между товарными концентратами в зависимости от физико-химических свойств своих минералов или от их связи с основными рудообразующими минералами.

На металлургическом переделе осуществляется извлечение всех полезных компонентов, причем процессы основной технологической цепочки, особенно головные, необходимы для извлечения всех основных и попутных компонентов, однако они направлены на извлечение в первую очередь основных цветных металлов. На различных стадиях основного технологического процесса содержащиеся в перерабатываемом сырье полезные компоненты переходят в газы, пыли, шламы, кеки, шлаки и другие полупродукты и отходы производства, из которых при достаточном содержании они могут извлекаться. Переработка отходов и полупродуктов ведется уже с целью извлечения содержащихся в них попутных полезных компонентов, а также доизвлечения основных полезных компонентов.

В настоящее время технически возможно извлечение практически всех полезных компонентов, содержащихся в рудах и концентратах цветных металлов. Для предприятий экономически целесообразно извлечение полезных компонентов при определенном их содержании в исходном сырье, полупродуктах и отходах производства и при наличии соответствующих отработанных технологий.

При переходе предприятий на самокупаемость и самофинансирование получение дополнительной прибыли за счет переработки отходов и внедрения новых ресурсосберегающих технологий имеет очень важное значение. Остановимся на ряде мероприятий, уже проводившихся в цветной металлургии [Чалов, Рыскин, 1987].

В горном производстве быстро растет удельный вес добычи руды системами с закладкой выработанного пространства, что обеспечивает значительное снижение потерь металлов в недрах.

При обогащении руд цветных металлов внедряется геолого-технологическое картирование месторождений, и на его основе — усреднение или посортная переработка руд; расширяется использование методов предварительной концентрации в тяжелых средах — рентгенорадиометрической, люминесцентной и пенной сепарации. Процесс обогащения в тяжелых средах позволяет эффективно и комплексно использовать бедное рудное сырье. Ведутся работы по освоению процесса радиометрической сортировки при переработке комплексных руд, что позволяет на действующих предприя-

тиях вовлекать в переработку забалансовые руды и повышать извлечение металлов.

В металлургическом производстве разрабатываются и осваиваются технологические процессы, обеспечивающие одновременно интенсификацию производства и ликвидацию вредного воздействия отходов производства на окружающую среду. Применяется и осваивается ряд автогенных процессов для переработки сульфидного сырья: плавка в печи с жидкой ванной и кислородно-факельная плавка сульфидного медного сырья, кислородно-взвешенная циклонная электротермическая плавка медно-цинковых концентратов. Применение автогенной технологии резко снижает объемы отходящих газов, облегчает возможности их улавливания и переработки.

При переработке низкосортного сырья, в частности забалансовых руд и отходов, все большее распространение получают гидрометаллургические процессы с использованием сорбции, экстракции, автоклавной техники. Так, для переработки трудноперерабатываемых пирротиновых концентратов, являющихся ценным сырьем для получения меди, никеля, серы, драгоценных металлов, разработана практически безотходная автоклавно-окислительная технология. Эта технология применяется на Надеждинском заводе Норильского горно-металлургического комбината.

В цветной металлургии есть примеры успешной реализации практически безотходных технологий (гидрометаллургический способ переработки цинкового сырья на Челябинском электролитном цинковом заводе). На предприятии организован водооборот, все металлургические агрегаты оснащены пылеулавливающим оборудованием. Серосодержащие газы обжигового передела используются для производства серной кислоты. Твердые отходы производства — свинцовые кеки, клинкер — отгружаются на свинцовые и медеплавильные заводы. Кадмиевые кеки и другие продукты перерабатываются непосредственно на заводе с получением кадмия, индия, таллия, цинкового купороса и другой продукции.

Повышение эффективности работы предприятий посредством внедрения новых технологий связано с определенными трудностями. Во-первых, организационные недоработки приводят к тому, что уже действующие, отработанные технологии далеко не всегда используются наилучшим образом. Причин здесь много. До сих пор на предприятиях нет автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП), охватывающих всю технологическую цепочку.

Как правило, автоматизированное управление технологическими процессами ведется только на отдельных переделах. В этом далеко не всегда виноваты предприятия. Не хватает хороших управляющих ЭВМ, надежных датчиков и анализаторов. Происходят срывы и задержки поставки новых материалов, особенно изготавливаемых на предприятиях других министерств. Нет четкой ориентации работы всех технологических переделов на конечный экономический результат. Учитывая рост затрат на строительство, можно ожидать, что новые технологии, внедряемые в рамках старого хозяйственного механизма, могут оказаться просто убыточными и поэтому внедрение их откладывается на будущее.

Во-вторых, оставляют желать лучшего качество и соответствие современному уровню машин и механизмов. Для ряда производств требуется принципиально новая техника, но разработка ее в стране затягивается, а возможности импорта зачастую ограничены.

В-третьих, недооценивается значение опытных производств (фабрик, цехов) в системе освоения месторождений. С учетом необходимости освоения месторождений труднообогатимых руд, комплексного использования минерального сырья опытные производства должны иметь мобильные схемы, чтобы на них отрабатывать новые технологические и технические решения. Вместо этого после создания промышленного производства опытное, как правило, ликвидируется, или же для него устанавливается план выпуска продукции.

Глава 2

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

§ 1. Основные типы моделей

Классификация моделей определяется особенностями моделируемого процесса, которые подробно были рассмотрены в главе 1.

Сформулированные ранее особенности непрерывных производственных процессов позволяют выделить следующие признаки — основания для классификации моделей:

- уровень объекта моделирования;
- назначение модели;
- информационная основа моделирования;
- методы построения моделей и принятия решений.

Остановимся подробнее на каждом из перечисленных признаков классификации.

Уровень объекта моделирования. В пределах объектов технико-экономического исследования непрерывного производства можно выделить два типа моделей, различающихся по масштабу исследования — модели микропроцессов и модели предприятий. Первый тип моделей описывает функционирование отдельного производственного процесса или технологического агрегата. В настоящее время модели такого типа преимущественно используются в рамках АСУТП. Второй тип описывает деятельность предприятия в целом или его крупных структурно-обособленных подразделений (цехов, технологических переделов). В зависимости от целей исследования, такие модели могут использоваться в календарном, текущем перспективном планировании, а также в анализе и прогнозировании.

В отличие от моделей предприятия, построение и использование моделей работы отдельных технологических агрегатов в литературе часто рассматривается как решение чисто технических, а не технико-экономических задач. Это представляется устойчивым заблуждением, так как рост экономической эффективности производства в рассматриваемом круге предприятий основывается либо на внедрении новых более совершенных агрегатов, либо на улучшении использования уже имеющихся. При моделировании на уровне технологических процессов или агрегатов появляется возможность меньшего, чем в моделях предприятия, агрегирования факторов, более точного и подробного их учета, непосредственного управления объектом моделирования во время исследования, а также в ходе дальнейшей эксплуатации. Все это увеличивает практическую значимость моделей отдельных агрегатов. Вместе с тем применение этих моделей ограничено условиями, для которых они построены. Модели такого типа сравнительно быстро устаревают, поэтому при решении задач в рамках АСУТП должна проводиться постоянная корректировка моделей, адаптация их к меняющимся условиям производства.

При построении моделей предприятия возможны два подхода. Первый заключается во взаимоувязке частных моделей отдельных технологических переделов в единую систему с последовательной оптимизацией по конечным результатам работы предприятия в целом (подробнее см. гл. 3, 6). Для второго подхода характерно то, что модели, описывающие более крупные системы, не комбинируют из моделей входящих в них процессов, а строят на основе первичных факто-

ров производства, но в более агрегированном виде. Таким образом, можно создать иерархию моделей одного типа, но разных масштабов. Каждый объект моделирования рассматривается как единое целое. По мере перехода от моделей меньшего к моделям большего масштаба происходит агрегирование факторов, но принципиальная структура модели остается неизменной. Данный подход оправдан тем, что на более высоких уровнях управления информация должна быть представлена в более агрегированном виде, при этом степень агрегации зависит от назначения модели и способа сбора информации (подробнее см. гл. 9).

Выбор способа построения макромоделей во многом зависит от характера сырьевой базы предприятия.

Среди предприятий с непрерывным производственным циклом выделяются два типа, различающиеся степенью зависимости от характера поставок сырья и полуфабрикатов на основные технологические переделы. Предприятия первого типа имеют в своем составе добывающие производства, либо за ними жестко закреплены предприятия-поставщики сырья. Иными словами, имеется собственная сырьевая база и отсутствуют конкурирующие поставщики и потребители сырья. В этом случае, если нет дефицита сырья, предприятие имеет определенную возможность управлять его качеством, применяя экономические и административные меры воздействия на добывающее производство. Такая ситуация характеризуется значительно меньшей неопределенностью внешних условий, чем на предприятиях другого типа, не имеющих стабильной сырьевой базы. Последние в меньшей степени могут влиять на своих поставщиков, а состав поставщиков сырья не является стабильным.

На предприятиях первого типа целесообразны постановка и решение задач управления всем технологическим циклом, нахождение оптимальных режимов работы технологических переделов, включая оптимизацию характеристик сырья, т. е. в данном случае модель предприятия строится на базе частных моделей отдельных производств.

На предприятиях же второго типа, наряду с задачами отыскания оптимальных технологических режимов в зависимости от характеристик качества сырья, важную роль играют задачи прогнозирования экономических показателей работы предприятий при изменении поставок сырья из различных источников, а также оценки возможностей развития предприятия в условиях неопределенности поставок сырья. Соответствующие примеры решения задач для предприятий обоих типов будут приведены во втором разделе книги.

Назначение модели. Этим вопросам посвящена глава 4. В настоящем параграфе эти вопросы рассматриваются лишь в той мере, в какой они определяют методику построения моделей. В общем случае модели используются в решении задач анализа, нормирования, планирования и управления производством. В зависимости от назначения модели и объекта моделирования их можно разделить на два класса: модели, предназначенные для принятия «стратегических» решений, и модели для принятия оперативных решений.

К первому классу относятся преимущественно модели анализа, нормирования и планирования, применяемые на уровне предприятий и отдельных технологических переделов при выборе экономически рациональных параметров их эксплуатации. Специфической чертой этого класса моделей является периодический характер их использования. На их базе возможны аналитические исследования и принятие решений сравнительно длительного срока действия. Например, построенные в результате исследования технико-экономические нормативы или регламент технологического режима являются эффективными до тех пор, пока не происходит существенных изменений условий производства. Обычно этот срок измеряется годами. Решения же, связанные с управлением качеством сырья и оптимизацией сырьевой базы, действуют и более длительное время.

Второй класс представляют модели оперативного прогнозирования и управления производством. Появление в арсенале технических средств автоматизации управляющих ЭВМ позволяет ставить вопрос об использовании в контурах управления технологическими агрегатами этого нового технического средства в режиме непосредственной связи с объектом. Управляющие ЭВМ позволяют успешно решать традиционные задачи управления технологическими процессами, а именно сбор, первичную обработку, регистрацию информации, осуществление функций регуляторов отдельных параметров процесса, сигнализацию и блокировку, программно-логическое управление операциями в определенной последовательности и др. Между тем возможности ЭВМ для управления технологическими процессами не исчерываются традиционными задачами; наличие гибкой системы обработки информации, выполнение различных расчетов в ходе процесса создают принципиальную возможность решения нетрадиционных задач управления. К ним относятся:

прогнозирование синтезированных переменных процессов и их использование для анализа, контроля и непосредственного управления;

косвенное измерение параметров, определение которых обычными методами затруднено или невозможно;

поиск оптимальных условий непосредственно на объекте; корректировка оптимальных условий в ходе производственного процесса, выполняемая на основе математической модели;

распределение нагрузок между агрегатами, оперативно-календарное планирование работы оборудования;

ситуационный анализ и прогнозирование результатов технологического процесса.

Особенности перечисленных задач этого класса — необходимость использования адаптивных саморегулирующихся моделей и применение быстродействующих ЭВМ в реальном масштабе времени.

Информационная основа моделирования. Построение и использование экономико-статистической модели во многом зависит от качества исходных данных (их полноты и достоверности), выбора основных элементов модели, изученности свойств и отношений между ними. Этот этап моделирования представляет собой процесс формирования последовательно уточняемой гипотезы. Основными его моментами являются: построение рабочих гипотез о наборе переменных и структуре связей; использование статистического эксперимента в процессе сбора информации, выбор признаков и их измерителей; конкретизация выборочной совокупности и др.

Формирование рабочих гипотез о наборе переменных и структуре связей. Моделирование экономических показателей промышленных объектов основывается на некоторой сумме априорных профессиональных знаний об объекте моделирования. Использованию формального математико-статистического аппарата предшествует стадия содержательного, логического моделирования, результатом которого является построение понятийной, словесной модели исследуемого процесса.

В задачу априорного анализа входит решение основных вопросов логической стадии анализа.

1. Определение набора элементов (факторов и экономических показателей), описывающих процесс функционирования исследуемых объектов.

2. Анализ структурных связей между отдельными элементами описания объекта (показателями и факторами производства).

3. Установление перечня допустимых операций над элементами и связями, т. е. выбор рационального типа экономико-статистической модели.

Выбор факторов производства представляет собой процесс последовательного уточнения первоначальной гипотезы. В этом процессе можно выделить следующие этапы-операции:

- 1) формирование первичной гипотезы о наборе факторов описания процесса;
- 2) оценка сформированного набора признаков коллективом экспертов;
- 3) анализ структурных связей переменных и их формализация;
- 4) сужение круга переменных, отбор существенных факторов для моделирования на основе результатов 2-го и 3-го этапов.

В основе формирования первичной гипотезы о наборе переменных лежит общая схема функционирования промышленного объекта. Ее детализация применительно к определенной ситуации заключается в придании конкретных названий группам факторов и их развертывании на поддающиеся измерению и учету операциональные характеристики.

На перечень переменных, включаемых в первичный набор, накладывает определенный отпечаток назначение модели, тип исследования и т. п. Так, для моделей прогнозирования желательно в набор включать переменные, известные к началу периода прогнозирования или легко поддающиеся оценке. При построении моделей оптимизации режима работы промышленного объекта важно учесть управляемость факторов производства; проведение поискового экономико-статистического исследования требует большего первичного набора переменных, чем при повторных, систематических анализах.

Сужение первичного набора переменных — процесс многостадийный, проводимый на всех этапах построения модели: при проведении априорного анализа и формировании рабочей гипотезы (еще до сбора исходной информации), на этапе предварительного анализа и преобразования исходной информации, на этапе собственно построения модели. В основе процесса сужения набора переменных на стадии формирования рабочей гипотезы обычно лежат результаты экспертного опроса и содержательные соображения разного типа: возможность и точность измерения того или иного фактора; трудоемкость сбора информации; диапазон вариации и возможность регулирования значений факторов; максимально допустимое число переменных модели; функциональные связи переменных и др.

При решении задач априорного анализа целесообразно использовать накопленный опыт работы специалистов с по-

мощью методов экспертных оценок. Наиболее удобная форма его реализации — анкетный опрос.

Статистический анализ материалов анкетного опроса предполагает группировку и агрегирование признаков; оценку степени согласованности ответов экспертов по каждому признаку в отдельности и в целом по всему набору; выделение групп экспертов с «близким» мнением о порядке признаков в случае существенных расхождений в ответах; выявление причин разброса мнений; анализ качества экспертных оценок и компетентности экспертов; формирование группового решения.

Априорный анализ структуры причинно-следственных связей является важной стадией экономико-статистического моделирования. К сожалению, ввиду неизученности логики производственного процесса он не всегда возможен. Однако могут быть высказаны некоторые профессиональные соображения о характере и направлении связей. Необходимость поиска методов априорного анализа связей в первую очередь вызвана тем, что связи набора признаков, описывающих процесс функционирования реального объекта, имеют определенную структуру и ориентацию. По направлению влияния признаки могут быть разделены на отдельные слои — входные, промежуточные разных степеней, выходные. Возникновение таких слоев вызывается, с одной стороны, направленностью причинно-следственных связей, с другой — последовательностью действия факторов (их изменений) во времени. Связи можно рассматривать с точки зрения их типа, ориентации и силы (которой можно дать количественную оценку). Если подходы к метрической оценке силы связи разработаны достаточно полно и широко представлены в статистической литературе, то вопросы анализа структуры связей получили гораздо меньшее освещение. Между тем качественный анализ структуры связей может служить одним из предварительных этапов экономико-статистического исследования.

Для решения данной проблемы представляется целесообразным использовать аппарат теории графов [Берк, 1962; Зыков, 1969]. Такой подход позволяет каждой изучаемой системе переменных ставить в соответствие определенную логическую структуру, формализуемую некоторым графом (матрицей смежности). В результате исследователь получает в свое распоряжение язык строгой и компактной записи качественных знаний, что позволяет проводить более глубокий анализ изучаемых явлений.

Методы активного и пассивного эксперимента при сборе исходной информации. Изложение материала в данном пункте проводится с позиций определения метода (или сочетания методов) сбора информации. Что касается самих методов организации статистического эксперимента, то им посвящена обширная литература (см., например [Адлер и др., 1976; Налимов, 1970]).

Можно выделить два основных источника информации о функционировании экономических объектов: а) непосредственные наблюдения и регистрация интересующих исследователя сведений; б) ранее накопленная информация, содержащаяся в первичной учетной и технической документации.

Следует подчеркнуть большое значение использования в исследовательской работе второго источника информации. Дело в том, что получение достаточного объема исходной информации путем непосредственных регистраций является очень трудоемкой процедурой. Между тем на промышленных предприятиях в виде данных систематического производственного учета с течением времени накапливается большой объем непрерывно нарастающей информации. Применение статистических методов обработки позволяет рассматривать данные этого учета как информацию о ранее поставленных массовых опытах. Правда, она обладает рядом недостатков, так как не всегда полностью соответствует поставленным в исследовании задачам. Однако во многих случаях эти недостатки компенсируются ее доступностью и дешевизной.

Приведенной классификации источников информации почти полностью соответствует и классификация методов сбора информации. По методу сбора различают информацию экспериментального и неэкспериментального характера. В первом случае эксперимент заранее планируется и управление процессом осуществляется самим исследователем. (Отсюда возникло название самого метода исследования — «активный эксперимент».) Основываясь на априорных, профессиональных сведениях об изучаемом процессе, исследователь выбирает некоторую оптимальную стратегию для управления экспериментом. Процесс исследования обычно разбивается на отдельные этапы. После каждого этапа исследователь получает новую информацию, позволяющую ему изменить стратегию управления.

Во втором случае роль исследователя пассивная. Он собирает информацию после совершения события. Единственная возможная форма контроля со стороны исследователя — применение какого-либо метода целенаправленного отбора данных из имеющейся информации, отражающей независи-

мый от исследователя ход процесса. Этот способ применяется в так называемом пассивном эксперименте.

Сбор информации по заранее составленному плану статистического эксперимента (активный эксперимент) дает ряд преимуществ по сравнению с пассивным экспериментом. Во-первых, исследователь имеет возможность определять необходимый набор переменных и их уровни, а при пассивном эксперименте исследователь вынужден ограничиваться лишь той информацией, которая имеется. Во-вторых, при активном эксперименте исследователь может контролировать уровень и комбинацию факторов, что позволяет их расположить более равномерно в факторном пространстве. Данные пассивного наблюдения обычно концентрируются около установившихся средних значений и соотношений величин. Вследствие этого часто возникает явление мультиколлинеарности, когда на практике придерживаются постоянного или почти постоянного соотношения между несколькими переменными. В этом случае раздельное влияние этих переменных вообще не может быть установлено. Даже в более благоприятных случаях уровни и соотношения переменных при пассивном эксперименте охватывают только часть диапазона изменения переменных. Контроль за уровнем и комбинацией факторов, возможность их ортогонализации при активном эксперименте позволяет выявить независимое влияние отдельных факторов. Активный эксперимент особенно удобен на стадии предварительного анализа производственного процесса в лабораторных условиях и на промышленных установках.

Из сказанного, однако, не следует, что экспериментальный способ сбора информации всегда предпочтительней неэкспериментального. Во многих случаях, особенно при построении моделей работы крупных объектов или предприятий в целом, активный эксперимент попросту не может быть организован технически.

При проведении активного эксперимента в производственных условиях (там, где он возможен) нарушается нормальная работа объекта и снижается ее эффективность. Технологический режим задан, поэтому на интервалы варьирования факторов наложены жесткие ограничения, обусловленные риском получить брак. Однако для выявления эффекта в активном эксперименте необходимо широкое варьирование факторов. Там, где возможны оба способа сбора информации, выбор метода зависит от экономических соображений: необходимо сопоставить разницу в стоимости исследования с полезным эффектом от повышения точности модели. При этом следует подчеркнуть, что нельзя проводить

резкую грань между качеством экспериментальной и неэкспериментальной информации. В действительности при постановке эксперимента исследователь не в состоянии полностью контролировать факторы производства. Неучтенные факторы всегда будут оказывать влияние, хотя и меньшее, чем при пассивном эксперименте. С другой стороны, при наличии хорошего и систематического учета иногда может быть получен такой комплекс отчетных статистических данных, который по своему качеству сопоставим с экспериментальными данными. Для этого прибегают к целенаправленному отбору данных производственного учета. Иногда целесообразно прибегать к сочетанию обоих методов сбора информации. Предварительно по данным пассивного эксперимента оценивается влияние факторов, выделяются наиболее значимые, а затем оптимум находится методом активного эксперимента путем варьирования уровня отобранных факторов.

Имеются и принципиальные соображения, ограничивающие область применения активного эксперимента. Сущность их сводится к следующему. ЭСМ предназначена для разработки рекомендаций при работе в условиях неопределенности. При проведении же активного эксперимента вносится элемент преднамеренности, изменяется обычный ход производственного процесса. Поэтому возникает важная проблема перехода от экспериментально обоснованной модели к конкретным производственным условиям. Дело в том, что модель может быть построена для одних уровней включенных в нее переменных, а в действительности могут иметь место другие значения этих переменных. При активном вмешательстве в процесс часть факторов закрепляется искусственно только на период опыта, и влияние изменения их на величину функции опытом не учитывается, хотя на практике оно может иметь место. Модели, построенные на материалах пассивного эксперимента, включают в неявном виде оценку влияния этих неучтенных факторов.

Типы признаков и их измерение. В экономико-статистических исследованиях применяются три типа признаков, измерение которых проводится на четырех типах шкал (шкала наименований, шкала порядка, шкала интервалов и шкала отношений) [Супес, Зинес, 1967].

Классификационные признаки определяют неупорядоченное разбиение множества объектов. Измерение этих признаков производится по шкале наименований, которая обладает весьма слабыми числовыми свойствами. Для этих шкал допустима лишь операция «равенство — неравенство». Номера или наименования просто отличают один объект (группу

объектов) от другого. Эти признаки (градации признаков) могут у определенной единицы совокупности обнаруживаться или нет и числом не выражаются. При исследовании можно лишь отмечать наличие или отсутствие данной градации признака у единицы совокупности и подсчитывать число единиц, обладающих или не обладающих этой градацией.

Каждый классификационный признак порождает разбиение совокупности на определенное число неупорядоченных классов. Число классов равно числу градаций (вариантов) признака. Здесь можно выделить классификационные признаки с двумя градациями (бивариантные) и с большим числом градаций (поливариантные). Бивариантные признаки дают простейшую дихотомическую классификацию, в соответствии с наличием или отсутствием у объектов определенной градации признака, т. е. отвечают на вопросы «да» или «нет».

В практике исследовательской работы часто оказывается целесообразной перекодировка поливариантных признаков в бивариантные. Это обусловлено соображением удобства математической обработки информации и содержательными соображениями: отсутствие определенной градации признака может иной раз оказаться более характерной особенностью типа, чем наличие той или иной градации.

Ранговые признаки — это признаки, порождающие упорядоченное разбиение совокупности на классы. Измерение этих признаков производится по шкале порядка, допускающей операции «равенство — неравенство» и «больше — меньше». В этих шкалах приемлемы любые монотонные преобразования.

Признак называется количественным, если его значения выражаются числами, и он может быть измерен по каждой единице совокупности. Они дают числовую характеристику степени проявления свойств объекта. Измерение количественных признаков производится по шкалам двух типов: шкале отношений и шкале интервалов. Для шкалы отношений допустимыми являются преобразования подобия. В ней возможны все арифметические операции: «равенство — неравенство», «больше — меньше», «равенство интервалов» и «равенство отношений». Для шкалы интервалов допустимым является положительное линейное преобразование. Могут выполняться следующие операции: «равенство — неравенство», «больше — меньше» и «равенство интервалов». Последнее свойство позволяет ввести единицу измерения.

Отличительная особенность количественных признаков — возможность жесткого упорядочения значений по числовой

шкале. Количественные признаки могут быть дискретными или непрерывными. В практической работе необходимо выделить случай дискретных количественных признаков с небольшим, строго фиксированным числом значений. Например, предприятие выпускает электродвигатели со скоростью вращения 750, 1500 и 3000 об./мин. Других значений признак «число оборотов» не принимает. Такого рода количественные признаки по своим свойствам приближаются к балльным (ранговым) оценкам, они вызывают разбиение совокупности на упорядоченный ряд дискретных классов. Отличие заключается в возможности выполнения с ними арифметических действий. Иногда таким дискретным количественным признакам с небольшим числом градаций целесообразно придавать форму бивариантных качественных признаков.

К особой разновидности количественных признаков относится набор относительных величин, характеризующий структуру экономических процессов (сортамент продукции, состав лесонасаждений, химический состав сырья, структура производственных фондов и др.). Специфическим для этой разновидности признаков является использование комплекса взаимосвязанных измерителей для описания одного явления: например, сортамент продукции описывается удельным весом отдельных видов изделий в общем объеме производства. При использовании в статистическом анализе признаков такого типа необходимо учитывать то, что их сумма для каждого объекта равна постоянному числу (единице или 100 %). Поэтому во избежание мультиколлинеарности при построении регрессионных моделей, по крайней мере, одна из составляющих структур должна быть исключена.

Числовые значения количественных признаков, используемые для описания объектов исследования, всегда зависят от начала отсчета каждого признака и от масштаба измерения, поэтому значения различных признаков несопоставимы. Для удобства статистического анализа принято приводить количественные признаки к стандартному виду — центрировать и нормировать. Кроме удобства статистической обработки преобразование количественных признаков часто преследует и другие цели. Например, часто после центрирования и нормирования пространственные распределения становятся более устойчивыми во времени.

Поскольку описание объектов экономико-статистического исследования часто включает признаки разных типов, а статистические методы рассчитаны на обработку информации определенных видов шкал, преимущественно метрических, то перед исследователями возникает серьезная проблема со-

измерения признаков различной природы. Наиболее радикальный путь решения этой задачи заключается в разработке формального аппарата моделирования, пригодного для измерения связи между признаками различных типов.

Здесь можно указать на методы пробит- и логит-анализа [Майзель, Шнайман, 1969], сущность которых заключается в некотором преобразовании количественного признака, связанного с изучаемыми качественными признаками и приводящего к изменению масштаба этого признака.

В работах Б. Г. Миркина [1976, 1980] предложен подход, позволяющий измерять взаимосвязь между ранговыми и классификационными признаками. При определенной потере информации этот подход может быть распространен и на количественные признаки (путем перекодирования последних в ранговые).

Другой путь соизмерения разнотипных признаков, наиболее приемлемый в настоящее время, — это использование комбинированных моделей для описания процесса [Розин и др., 1984]. Прежде чем переходить к соизмерению признаков, необходимо выяснить, нельзя ли обойтись набором признаков одного типа или, в крайнем случае, сократить число качественных признаков за счет формирования их количественного эквивалента. Каждый качественный признак разбивает совокупность на классы по числу его градаций. Если найдется некоторая функция количественных признаков, существенно различающая эти классы объектов, то ее можно считать количественным эквивалентом рассматриваемого качественного признака. В этом случае последний не дает дополнительной информации и его можно исключить.

Если количественные и качественные признаки взаимозаменяемы, то выход заключается в построении комбинированных моделей, например, дискретно-непрерывных. В этих моделях качественные признаки учитываются разбиением выборочной совокупности на классы, а количественные — построением статистических зависимостей в выделенных классах.

Способы формирования выборочных совокупностей. Следует различать пространственные, временные и пространственно-временные выборки.

Обозначим n — число изучаемых объектов; y_{it}^l — значение l -го моделируемого показателя i -го объекта в t -м периоде ($i = \overline{1, n}$; $l = \overline{1, k}$; $t = \overline{1, T}$); x_{it}^r — значение r -го фактора производства для i -го объекта в t -м периоде ($i = \overline{1, n}$; $r = \overline{1, p}$; $t = \overline{1, T}$). Тогда для пространственной выборки

$t = \text{const}$, $n \gg 1$, $k \geq 1$, $p \geq 1$. Для одномерной временной выборки $n = 1$, $k = 1$, $p = 0$, $t \gg 1$. Для многомерной временной выборки $n = 1$, $k \geq 1$, $p \geq 1$, $t \gg 1$, а для пространственно-временной выборки $n \gg 1$, $k \geq 1$, $p \geq 1$, $t > 1$.

При моделировании непрерывных производственных процессов пространственные выборки используются сравнительно редко. Главная проблема при их использовании — учет неоднородности различных источников сырья, технологических способов и т. д.

Более широко используются временные и пространственно-временные выборки.

Модели, построенные на основе одномерных временных выборок, либо могут иметь самостоятельное значение как инструмент анализа динамики показателей и их прогнозирования, либо являться вспомогательным элементом при построении общей динамической модели.

Методы исследования динамических рядов отдельного показателя относятся к наиболее распространенным. Имеется довольно богатый формальный аппарат. Но область прямого использования этого подхода к моделированию и прогнозированию экономических показателей ограничена. Это связано с идейным содержанием метода прогнозирования по отдельным динамическим рядам — прогноз осуществляется по собственной предыстории изменения показателя без вскрытия причин развития и представляет собой прямую экстраполяцию. Она возможна только при условии, что динамика показателя сохранится в будущем. Такое условие соблюдается, как правило, для агрегированных, интегральных показателей больших систем в целом. Область применения этого приема ограничена также размерами рядов. Далее, однофакторные динамические модели не позволяют прогнозировать показатели новых объектов, так как они жестко привязаны к конкретному объекту. Не играя самостоятельной роли в прогнозировании экономических показателей методы анализа динамических рядов в то же время являясь обязательным составным элементом всех других методов описания динамики.

Необходимо отметить, что если методы анализа одномерных временных рядов довольно хорошо разработаны и освещены в литературе, то по методам построения моделей на основе анализа многомерных рядов материалов гораздо меньше. Отличие этого подхода от предыдущего заключается в переходе к многокомпонентной модели, описывающей развитые системы рядов. Динамический ряд показателя представляется как функция динамических рядов производст-

венных факторов с учетом сдвигов во времени (лагов). Достоинствами этого типа моделей являются учет причин изменения показателя и хорошая применимость к конкретному объекту (временная информация по отдельному объекту более однородна, чем пространственная по группе объектов). Особо следует отметить возможность выявления при анализе многомерных временных рядов величины запаздывания во времени действия отдельных производственных факторов, что играет большую роль при любых способах построения динамических моделей и при прогнозировании с их помощью. Такие модели помимо самостоятельного применения могут оказаться полезными и как вспомогательные элементы построения динамических моделей совокупности объектов. Недостатки моделей обусловлены характером информации — при коротких рядах не представляется возможным включать в модель достаточное число переменных, а главное, малая вариация отдельных факторов и их соотношений во времени не дает возможности отразить в модели достаточную область свободы. Динамические модели отдельного объекта непригодны для прогноза при существенных изменениях условий работы объекта (объема и структуры фондов, технологии и т. п.), невозможно также использование этих моделей для других объектов. Хотя необходимо заметить, что область свободы здесь все-таки шире, чем у жестко привязанных динамических рядов отдельного показателя.

Наиболее широкие возможности для статистического моделирования открываются при использовании пространственно-временных выборок, т. е. совокупностей многомерных временных рядов.

Во всех случаях независимо от вида исходной информации модель, построенная для совокупности объектов, имеет ряд преимуществ перед моделями отдельного объекта. Как правило, на информации об отдельном объекте затруднительно построить полную модель с переменной структурой. Дело в том, что объект зачастую не реализует большинства возможных состояний структуры связей.

Кроме того, наличие большого числа выборочных объектов позволяет повысить надежность и устойчивость оценок параметров моделей. Модели с переменной структурой, построенные на базе информации по совокупности объектов, обладают максимально возможной для статистических моделей областью приложения, ибо они описывают большинство реализованных состояний. Анализ этих моделей позволяет конструировать и новые, потенциально возможные состояния объектов.

Методы построения моделей и принятия решений. Для решения многообразных задач экономического анализа, планирования, прогнозирования и управления непрерывным производством использование традиционных статистических подходов (корреляционно-регрессионный анализ) часто оказывается хотя и эффективным, но явно недостаточным. Для того чтобы полученные традиционные статистические модели адекватно описывали изучаемый процесс, необходимо соблюдение целого ряда содержательных и формальных требований к исходной информации. К содержательным требованиям относятся: однородность совокупности, возможность описания моделируемой зависимости непрерывной функцией; устойчивость структуры совокупности и зависимостей во времени; достаточный объем выборки и др. Формальные требования связаны с тем, что параметры модели определяются методом наименьших квадратов, и необходимо соблюдение следующие условия его применимости:

ошибки измерений являются независимыми случайными величинами и не связаны с вариацией входных переменных;

ошибки распределены нормально с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией, не зависящей от входных переменных;

все входные переменные измерены без ошибок;

среди входных переменных нет линейно связанных;

отсутствует автокорреляция ошибок измерения.

При выполнении этих предпосылок оценки параметров модели, полученные методом наименьших квадратов, являются несмещенными, состоятельными и эффективными. Поэтому с вероятностно-статистической точки зрения применение данных методов обоснованно. Однако для реальных экономических данных эти требования полностью не удовлетворяются, имеет место отступление от них, что в зависимости от цели построения модели влечет за собой различные последствия. В одних случаях модель даже при нарушении требований может иметь практическое значение, а в других случаях расчеты по ней дают трудноинтерпретируемые, а то и абсурдные результаты. Это делает необходимым поиск путей построения экономико-статистических моделей, учитывающих специфические особенности исследуемых процессов.

Улучшения качества моделей требует интенсивно развивающийся в последние годы процесс внедрения экономико-математических моделей в технологию планирования. Для сближения экономико-математических моделей и плановых задач необходимо конструирование моделей с заданными

свойствами, обеспечивающих выполнение комплекса априорно заданных требований. К таким требованиям в первую очередь относятся адаптивность, управляемость и оптимизируемость.

Повышению адекватности и формированию новых функциональных свойств экономико-статистических моделей производственных процессов может способствовать переход к созданию гибридных форм моделей, к синтезу моделей с заранее заданными свойствами. На современном уровне развития экономико-математического моделирования значительный прогресс в повышении качества моделей может обеспечиваться путем заимствования принципов и подходов из различных областей прикладной математики — создания гибридных конструкций. Один из путей решения этой задачи — расширение собственно статистического инструментария, переход от ограниченного круга моделей корреляционно-регрессионного анализа к более широкому классу моделей анализа данных [Браверман, Мучник, 1983].

В последние десятилетия в связи с увеличением объема эмпирических исследований и с широким распространением таких исследований в самых различных областях (техника, геология, экономика, социология, медицина и т. д.) произошло значительное усложнение представлений о соотношении между эмпирическими данными и извлекаемой из них и нужной исследователю информацией. Резкое расширение сферы применения методов анализа эмпирических данных заставило исследователей обратить внимание на следующие моменты, которым ранее не придавали особого значения.

Во-первых, эмпирические данные, как правило, не содержат непосредственной информации о наиболее существенных «внутренних» характеристиках или свойствах изучаемого явления (их называют факторами). Более того, исследователю заранее не известно, каковы эти факторы и каким образом их можно измерить. Сами же эмпирические данные представляют собой значения множества параметров, которые лишь косвенно, в совокупности отражают существенные, интересующие исследователя свойства.

Во-вторых, интересующей исследователя информацией могут быть даже не численные значения существенных параметров, а сведения о возможных типах изучаемых объектов, так что целью эмпирического исследования может быть получение типологии объектов, типологии, которая также не известна исследователю заранее.

В-третьих, эмпирические данные могут иметь необычный вид. Например, описание взаимодействий между элементами

какой-либо большой системы может иметь вид большого числа одновременно изменяющихся кривых и т. д.

Во всех случаях вопрос о том, что является полезной информацией, совсем не очевиден и требует специального рассмотрения.

Новые представления о характере полезной информации, содержащейся в эмпирических данных, а зачастую и сам характер подобных данных не позволяют использовать для их обработки классические статистические методы. В связи с этим возникли новые задачи обработки эмпирических данных, а значит, и новые методы решения таких задач.

Это прежде всего задачи регрессионного и факторного анализов. Регрессионный и факторный анализы обогатились рядом новых моделей и методов, например, такими, как модель структурных уравнений регрессии или методы группировки параметров, так что в целом они приобрели новое содержание.

Вторая группа задач обработки данных — это задачи получения типологии изучаемых объектов. С ними связаны такие направления, как распознавание образов, методы автоматической классификации (или таксономии) и т. п.

Совершенно новые эффекты обнаружались при комбинированном применении к эмпирическим данным методов формирования факторов и методов автоматической классификации с тем, чтобы с каждым фактором была связана своя типология. Оказалось, что полученные типологии легко поддаются интерпретации и их можно понимать как систему терминов, позволяющих достаточно коротко описывать отдельные явления. Такой подход к проблеме обработки данных оказался в достаточной степени универсальным — таким способом удалось представить задачи обработки экспериментальных кривых. Тем самым был создан некий подход к обработке эмпирических данных самой различной природы, получивший название анализа данных.

Хотя отдельные методы обработки данных, связанные с новыми представлениями о характере полезной информации, и были предложены относительно давно, именно в последние 10—15 лет они получили существенное развитие и постепенно сложились в некоторый конгломерат моделей и методов, подлежащих совместному изучению и использованию.

Использование широкого спектра методов анализа данных позволило конструировать и использовать в исследованиях новые типы экономико-статистических моделей: клас-

сификационные, дискретно-непрерывные (кусочно-линейные), модели с переменной структурой и др. [Розин и др., 1984; Розин, Ягольницер, 1981].

Однако использование нового математико-статистического инструментария не решает всех проблем экономико-математического моделирования непрерывных производственных процессов. Потребовалось дополнительное использование моделей других классов и в первую очередь оптимизационных линейно-программных моделей. Использование ЭСМ в принятии решений предполагает наличие у них таких свойств и возможностей, которые не может обеспечить традиционный способ построения ЭСМ. Помимо требования достаточной адекватности описания экономического явления, применение ЭСМ в планово-экономической практике требует наличия у них ряда специальных функциональных свойств и характеристик.

Процесс планирования и управления это, по существу, процесс принятия решений и контроля за их выполнением. Поэтому и основное функциональное требование к ЭСМ, предназначенной для использования в технологии плановых расчетов, — это пригодность для задач принятия решений, которые характеризуются наличием цели (или целей), альтернативных линий поведения и ограничений. Здесь возникает известное противоречие между природой традиционной статистической модели и содержанием задачи принятия решений.

Известно, что в традиционных ЭСМ главный предмет изучения — процесс развития экономической системы в пространстве и во времени. Эти модели более приспособлены для выявления тенденций и закономерностей производства, имевших место в прошлом, знание которых больше необходимо для прогнозирования, чем для принятия решений. Они могут быть названы моделями функционирования экономических объектов.

Выход из положения заключается в конструировании оптимизируемых ЭСМ, в которых синтезируются дескриптивный и нормативный подходы. Статистический инструментарий применяется на этапе конструирования модели, а методы математического программирования выступают как способ ее решения.

Широкое использование при моделировании непрерывных производств находит также комбинация статистических и имитационных подходов (имитационные статистические модели), балансовых и статистических моделей и другие комбинации.

Разумеется, пути построения гибридных моделей различны для разных объектов исследования. Рассмотрим необходимость применения гибридных экономико-статистических моделей при исследовании функционирования промышленного предприятия.

При использовании методов регрессионного анализа работа промышленного объекта может быть первоначально описана несколькими регрессионными уравнениями, причем каждое уравнение описывает зависимость одного из выходных показателей от группы входных. В тех случаях, когда цель исследования — получение описательной модели объекта, этого может оказаться достаточно. Но во многих ситуациях такой подход явился бы сильным упрощением, так как при этом в значительной степени игнорируются системные связи в объекте. Поэтому для решения задач исследования действующей сложной производственной системы модель, описывающая процессы ее функционирования, должна в общем случае включать систему взаимосвязанных регрессионных уравнений, балансовых соотношений и других ограничений, вытекающих из априорных знаний о структуре и логике моделируемого процесса.

Остановимся несколько подробнее на причинах включения балансовых соотношений в дескриптивную статистическую модель.

Основной частью информационной базы для дескриптивной модели непрерывного производства служит система уравнений множественной регрессии, описывающая отдельные стороны и этапы реального процесса функционирования объекта за прошлый период. Но при этом могут возникнуть определенные трудности. На основе имеющейся информации о показателях деятельности предприятия и его подразделений далеко не всегда можно количественно описать все необходимые связи. Причины здесь две. Первая заключается в том, что часто имеются тенденции резкого изменения отдельных факторов во времени, причем изменение управляемых на уровне моделируемого объекта факторов направлено на то, чтобы устранить или, по крайней мере, ослабить отрицательное влияние внешних факторов. Применяемое обычно описание функционирования объекта в терминах «вход — выход» здесь фактически бессильно.

Вторая причина заключается в том, что ряд управляемых факторов оказывается закрепленным на некотором рациональном, но зачастую далеко от оптимального уровня. Вариации этих факторов очень малы, и оценить их влияние на выходные показатели практически невозможно.

В силу отмеченных причин необходимо отражение в дескриптивной модели некоторых связей исследуемого процесса каким-то другим способом. Имеются и другие причины введения в модель функционирования промышленного объекта дополнительных уравнений и балансовых соотношений. Так, в уравнениях регрессии обычно оцениваются зависимости между разного рода удельными и относительными показателями, поскольку именно такие зависимости носят более устойчивый во времени характер. В то же время вход объекта характеризуется и абсолютными показателями. При этом, например, объем поставок отдельных видов сырья может оказывать большое влияние на технико-экономические показатели работы предприятия. Некоторые выходные показатели также являются объемными (объемы производства в натуральном и стоимостном выражении, прибыль и т. д.). При включении в модель абсолютных показателей переход от них к относительным и наоборот может быть, как правило, легко осуществлен в модели с помощью балансовых соотношений.

В целом построение гибридной дескриптивной модели непрерывного производства можно представить следующим образом. На основе уравнений множественной регрессии для отдельных показателей с учетом результатов логического анализа внутрисистемных связей строятся цепочки зависимостей. При этом для каждой зависимой переменной, включая результирующие выходные показатели, чаще всего строится одно уравнение. В случае необходимости для повышения степени адекватности модели в уравнения могут быть добавлены факторы, влияние которых оценивается по данным специальных экспериментов и исследований. Для учета объемных показателей и согласования показателей производства с расходами сырья и материалов вводятся балансовые ограничения.

Результатом является взаимосвязанная система регрессионных уравнений и априорных ограничений, по которой можно проводить численные расчеты, задавая значения входных параметров. Этой системой и будет представлен оператор, преобразующий входы производственной системы в ее выходы. В наиболее простых случаях, например, когда все уравнения и ограничения системы линейны, оператор преобразования может быть исследован аналитически. В результате возможно получение «приведенной» формы оператора, выражающей непосредственную количественную связь входов и выходов, получение «сквозных» коэффициентов влияния отдельных входных параметров на выходные пока-

затели. Если же хотя бы часть нормативных ограничений и балансовых условий имеют нелинейную форму, аналитическое исследование модели усложняется. В этом случае для изучения оператора преобразования уже требуется применение численных методов исследования, проведение машинных имитационных экспериментов.

Для осуществления экспериментальных расчетов по модели производственной системы необходимо задать дополнительные ограничения на область ее функционирования в виде двусторонних ограничений на переменные модели. Часть таких ограничений отражает границы изменения соответствующих переменных в выборке, по которой строилась модель, другие ограничения задаются априорно из логических соображений, а также прогнозных данных. В таком виде модель пригодна как для решения задач прогноза развития объекта, так и для нахождения оптимальных режимов ведения производственных процессов.

Таким образом, при моделировании непрерывных производственных процессов используется та или иная комбинация моделей анализа данных с балансовыми, имитационными, оптимизационными моделями.

По этим классам базовых моделей существует обширная литература. Однако сравнительно слабо освещены методические подходы к использованию в прикладных технико-экономических исследованиях следующих методов анализа данных — многомерной классификации (кластер-анализа) и анализа экспериментальных кривых. Этим вопросам посвящены следующие два параграфа настоящей главы.

§ 2. Методы анализа структуры многомерной совокупности

Статистическая совокупность обычно объединяет комплекс отличных друг от друга объектов или явлений, что позволяет делить ее на частные подсовокупности. Для этого используются методы типологической группировки (классификации). При моделировании зависимостей необходима такая типология, которая обеспечивает образование групп объектов с одинаковым (близким) характером зависимости показателей от факторов, т. е. выделение из всей совокупности подобластей со стабильной структурой влияния.

Задача типологической группировки решается сравнительно просто только в тех случаях, когда различия их очевидны, устойчивы и могут быть описаны одним или несколькими признаками. Однако на практике это бывает редко.

Принадлежность группируемых явлений к общей совокупности приводит обычно к появлению у них некоторых общих особенностей, маскирующих различия между типами. Еще более усложняет группировку недостаточно четкое обособление отдельных типов друг от друга в реальной действительности, существование явлений промежуточного характера, множественность признаков описания объекта и ряд других обстоятельств. Поэтому задача проведения качественной типологической группировки совокупности весьма сложна. В ней, как может быть ни в какой другой задаче экономико-статистического исследования, должен соблюдаться принцип примата содержательного анализа над формальными построениями.

По способу формирования типологических групп следует различать две основные системы классификации. Первый способ заключается в формировании таких групп, все объекты которых имеют одинаковые значения классификационных признаков. При втором способе — объекты, образующие группы, могут иметь различные значения классификационных признаков.

Первый способ классификации (последовательный) исторически более ранний. Типичный пример его реализации — комбинационная группировка, при которой формирование групп производится путем последовательного разбиения совокупности сначала по одному признаку, полученных частей — по другому и т. д. Здесь строго соблюдается принцип иерархии групп. Второй способ классификации, когда группы формируются на основе близости объектов одновременно по большому числу признаков (многомерная классификация), получил широкое применение в последние десятилетия вместе с разработкой методов распознавания образов и появлением ЭВМ.

Попытаемся сопоставить эти два метода типологической группировки.

Как и комбинационная группировка, многомерная классификация может выступать как инструмент решения одной из основных проблем экономико-статистического исследования — классификации явлений, объектов, процессов.

При использовании методов комбинационной группировки классификация осуществляется путем последовательного логического деления совокупности по отдельным признакам. Сформированные в результате этого процесса группы характеризуются тем, что все их элементы обладают одинаковыми значениями комплекса признаков группировки.

В ходе развития научных исследований обнаружилось, что принципы чистой логики, лежащие в основе метода комбинационной группировки, нелегко применять к эмпирическому материалу. Опыт множества прикладных исследований свидетельствует о существовании естественных типов явлений, каждый из которых объединяет индивидуальные явления, обладающие большим числом общих признаков. Как правило, для естественного типа невозможно найти жесткого определения, выраженного через небольшой набор совпадающих признаков. В некоторых случаях те или иные объекты можно без всяких сомнений отнести к одному типу, несмотря на то, что у них отсутствуют или не совпадают несколько признаков из числа использованных при формировании группы. Все это обусловило необходимость разработки новых принципов группировки, отличных от традиционных.

Сущность этих новых принципов, лежащих в основе многомерной классификации, сводится к следующему. Классификация объектов производится не последовательно по отдельным признакам, а одновременно по большому числу признаков. Этот фиксированный набор признаков образует так называемое признаковое пространство. Каждому признаку придается смысл координаты. Если исследователь оперирует n признаками, то любой объект рассматривается как точка в n -мерном признаковом пространстве, и задача классификации сводится к выделению сгущений точек (объектов) в этом пространстве. Выделение этих сгущений в разных алгоритмах многомерной классификации производится по-разному, но общим для всех их является то, что группы (таксоны, классы) формируются на основании «близости» объектов по большому числу признаков.

Представляется, что подходы к формированию групп, используемые в многомерной классификации, лучше, чем комбинационные группировки, согласуются с положением о существовании естественных типов объектов, близких по комплексу признаков. Действительно, при использовании комбинационной группировки объект, отклоняющийся от нормы, характерной для группы, по одному-единственному признаку набора будет автоматически исключен из группы. Более того, если этот признак используется на первом шаге группировки, то объект может легко попасть в группу, очень далекую от той, с которой он в действительности имеет наибольшее сходство. Если использовать понятие признаков пространства, то группы, получаемые при комбинационной группировке, представляют собой сектора такого

пространства. При этом границы между секторами-группами обычно параллельны осям признакового пространства. Осуществляя классификацию методом комбинационных группировок, исследователь зачастую искусственно «рубит» признаковое пространство, подчас разрушая реально существующие в нем обособленно-однородные классы жестко заданными интервалами признаков. Этот основной недостаток делает комбинационные группировки не всегда эффективными для выделения типов объектов по комплексу признаков, так как с добавлением каждого нового признака опасность разрушения объективно существующих однородных групп возрастает. Следовательно, основное преимущество методов многомерной классификации заключается в том, что они позволяют с той или иной степенью приближения «нащупать» и выделить реально существующие в признаковом пространстве скопления точек (объектов), что связано с одновременной группировкой по большому числу признаков и использованием в качестве границ сложных поверхностей.

Необходимо отметить, что если реализация методов комбинационной группировки (или ее модификаций) возможна и без применения вычислительной техники, то методы многомерной классификации, как правило, требуют использования ЭВМ, в связи с чем их часто называют методами автоматической классификации. Между обычными методами группировки (комбинационная и ее модификации) и автоматической классификацией нет жесткой границы. Цели их совпадают, а основное различие состоит в том, что при использовании метода группировок исследователь имеет возможность априори сконструировать типы объектов. При использовании методов автоматической классификации исследователь лишь указывает направление поиска (заданием набора признаков, имеющих отношение к цели классификации), по отказывается на данном этапе исследования от самостоятельного формирования классов.

Выбор одной из указанных систем классификации во многом определяется характером признаков, составляющих описание объекта. В том случае, когда в описании объекта преобладают качественные признаки, их число не очень велико и априори известно, что они неравнозначны с точки зрения цели классификации, целесообразнее ориентироваться на первый, последовательный способ классификации. Правда, весьма жесткое ограничение на его применение — достаточный объем исходной совокупности. Если же описание объекта включает большое количество примерно равнозначных признаков, особенно, если эти признаки количест-

венные и вопрос иерархии признаков и групп не столь важен, — следует ориентироваться на многомерную классификацию. В отдельных случаях может оказаться полезной комбинация обоих указанных подходов. Например, предварительное последовательное разбиение совокупности на подсовокупности по содержательно наиболее важным признакам с последующим разбиением этих подсовокупностей на типы методами многомерной классификации.

Модификация метода комбинационной группировки — метод последовательных разбиений. Комбинационная группировка в силу своей простоты и ясности интерпретации результатов широко используется в практике статистического анализа. Однако ее применение в исследованиях в тех случаях, когда ставится задача получения достаточно однородных групп и число признаков группировки превышает 3—4, наталкивается на серьезные трудности. Это происходит потому, что получающиеся группы малы по объему и не пригодны для статистического анализа.

Возникает проблема нахождения рационального способа построения иерархической системы группировок в условиях ограниченности совокупности и наличия довольно значительного числа признаков, предположительно вызывающих неоднородность совокупности. Таким способом может стать многошаговый метод последовательных разбиений совокупности.

Метод основан на анализе коэффициентов вариации качественных признаков. Коэффициент вариации $Q(x)$ характеризует способность признака «различать» отдельные элементы исследуемой выборочной совокупности. Расчет значений коэффициента вариации качественных признаков $Q(x)$ основан на сопоставлении числа различных пар событий,

$$Q(x) = \left[m^2 - \sum_{i=1}^l m_i^2 \right] \cdot l / (l-1) m^2,$$

где l — число градаций признака x ;

m_i — число объектов, принимающих i -ю градацию признака ($i = 1, 2, \dots, l$);

m — число объектов совокупности, $m = \sum_{i=1}^l m_i$.

Коэффициент вариации качественных признаков $Q(x)$ реагирует только на характер распределения объектов по градациям признака (классам). Он принимает максимальное значение, равное единице при равенстве частот классов.

Нулевое значение коэффициент принимает тогда, когда вся совокупность образует по данному признаку один класс.

Получение малого значения коэффициента вариации $Q(x)$ (близкого к нулю) свидетельствует о том, что объекты распределены по классам крайне неравномерно, т. е. большинство объектов обладает одной градацией изучаемого признака и лишь небольшое число имеет отличную градацию. В этом случае может быть принято несколько решений. Если позволяют содержательные соображения и связь признака с моделируемым показателем слаба, то признаки с малым значением $Q(x)$ вообще могут быть исключены из рассмотрения. Другой выход (когда нельзя просто отбросить этот признак) — исключить из совокупности те несколько объектов, которые обладают этим отличным, оригинальным значением признака и тем самым также исключить аномалии признака. И наконец, если оба способа допустимы, то признак, обладающий малым значением коэффициента вариации, является кандидатом к исключению на последующих стадиях анализа. Что касается признаков с большим значением коэффициента вариации, то им следует уделить особое внимание при анализе структуры выборочной совокупности и оценке степени ее однородности.

Используя коэффициент вариации признака, можно предложить следующую процедуру формирования групп.

По каждому признаку вычисляется $Q_i(x)$, и разбиение совокупности производится по тому признаку, который имеет максимальное значение вычисленной меры. Если таких признаков несколько, то выбор среди них производится по содержательному смыслу.

В результате получим группы первого шага разбиения. После первого шага можно рассматривать полученные группы как самостоятельные совокупности и повторить в них указанную процедуру, т. е. найти $Q_i(x)$ для признаков всех групп на втором шаге.

Такое деление производится до тех пор, пока либо не достигнем желаемой степени однородности объектов, либо число элементов в группах не станет меньше заданного.

Помимо рассмотренного метода последовательных разбиений, ориентированного в основном на качественные признаки, к подобным процедурам, но для количественных признаков, относится метод, предложенный Г. С. Кильдишевым и Ю. И. Аболенцевым [1978] — метод $U(\rho^2)$ -группировки.

Этот метод позволяет определять оптимальные границы интервалов группировки, дает статистические оценки однородности исходной совокупности и получаемых на каждой

итерации групп. Метод имеет, таким образом, обоснованный критерий остановки процесса разбиений.

Многомерная классификация. Часто требования к качеству классификации заставляют использовать при построении классов не один признак, а множество. Например, при изучении производственно-хозяйственной деятельности предприятий исследователь сталкивается с большим набором характеристик, описывающих различные аспекты их функционирования (экономические, социальные, природно-климатические, технические и т. д.).

Многомерная классификация предусматривает распределение явлений, объектов по группам «похожих» на основе определенных критериев.

Поставить задачу классификации в строгих математических терминах — значит сформулировать целевую функцию классификации, т. е. выбрать меру сходства объектов (признаков) и указать критерий качества классификации.

«Естественная» классификация основана на интуитивном понятии «близости» или «сходства». Удачным считается такое разбиение выборочной совокупности V , при котором похожие объекты объединены в один класс.

Итак, чтобы провести многомерную классификацию, исследователю необходимо: сформулировать цель классификации; выбрать набор признаков классификации (признаковое пространство); определить меру сходства объектов; выбрать алгоритм и программу классификации; провести вариантыные расчеты; оценить результаты. Первые пять этапов представляют, по существу, постановку задачи классификации.

Исходные данные для задачи многомерной классификации обычно представляют в виде матрицы «объект — признак». Строками матрицы являются значения признаков, характеризующих каждый отдельный объект, а столбцами — значения признаков для рассматриваемой совокупности объектов.

М е р а с х о д с т в а. Выделяют три типа мер сходства: коэффициенты подобия; коэффициенты связи; расстояние в метрическом пространстве.

Первые две меры можно назвать мерами близости: чем больше их величина, тем «ближе» объекты друг к другу. Обратное положение с показателями расстояния: чем больше их величина, тем больше «различие» между объектами. Меры сходства могут определяться как между объектами, так и между признаками. Хотя сущность этой операции принципиально одинакова, некоторое предпочтение отдается использованию определенных видов мер сходства для

первого и второго случаев (об этом подробнее будет сказано позже).

К о э ф ф и ц и е н т ы п о д о б и я s используются для измерения степени близости между парами объектов, каждый из признаков описания которых принимает значения 0 или 1 (булевы). Формула расчета наиболее простого коэффициента подобия у двух сравниваемых объектов: $s = p/n$, $0 \leq s < 1$, где p — число совпадающих признаков; n — общее число признаков, по которым осуществляется сравнение.

В литературе предложено много модификаций коэффициентов подобия: Рао, Хаммана, Дейка и т. д. [Мапель, 1988].

Выбор того или иного коэффициента зависит от содержательных соображений (например, что важнее — совпадение или несовпадение данного признака) и от характера исходных данных (дихотомические или многовариантные признаки) и т. п. Преимущественная область применения коэффициентов подобия — многомерная классификация объектов, описываемых набором качественных признаков.

Часто в качестве мер сходства используются **к о э ф ф и ц и е н т ы к о р р е л я ц и и** как измерители силы связи между объектами (между строками матрицы «объект — признак»).

Однако встречаются объекты, обладающие такими признаками, которые не поддаются точной количественной оценке, но позволяющей сравнивать объекты друг с другом. В результате сравнения всю совокупность можно «ранжировать», приписав каждому объекту порядковый номер, соответствующий итогам сравнения с другими объектами. Если объекты обладают не одним, а двумя признаками подобного типа, то каждому объекту приписывают два порядковых номера в соответствии с «ранжировками» по обоим признакам. В этом случае выборочными мерами связи признаков служат коэффициенты ранговой корреляции.

Во многих случаях роль меры сходства играет **ф у н к ц и я р а с с т о я н и я**. С введением функции расстояния мы приходим к понятию метрического пространства. Это множество элементов какой угодно природы, в котором для любой пары элементов x_1 и x_2 определено вещественное число $d(x_1, x_2)$, называемое расстоянием и обладающее следующими свойствами:

1) расстояние $d(x_1, x_2) = 0$ тогда и только тогда, когда x_1 и x_2 совпадают;

2) для любых трех точек x_1, x_2, x_3 $d(x_1, x_2) \leq d(x_1, x_3) + d(x_3, x_2)$ — правило треугольника;

3) $d(x_1, x_2) = d(x_2, x_1)$ — правило симметрии.
Хеммингово расстояние — для булевых признаков

$$\bar{d}_{ij} = \sum_{l=1}^n |x_{il} - x_{jl}|.$$

Пространство признаков в данном случае представляет n -мерный двоичный куб, расстояние между вершинами которого равно числу несовпадающих разрядов соответствующих n -разрядных двоичных векторов описаний объектов x_i и x_j .

Евклидово расстояние

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1}^n (x_{il} - x_{jl})^2},$$

где x_{il} — значение l -го признака на i -м объекте. Евклидово расстояние обладает существенным недостатком: в нем не учитывается возможная неравномерность осей пространства. При ненормированных осях возможен такой случай, когда два объекта, сходные по всем признакам кроме одного, по которому они сильно различаются, будут далеки друг от друга в евклидовом пространстве. Поэтому часто вводят взвешенное евклидово расстояние, где подбором весов ω_l пытаются нормировать оси пространства

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1}^n \omega_l (x_{il} - x_{jl})^2}, \quad 0 \leq \omega_l \leq 1.$$

Обычно величина ω_l обратно пропорциональна среднеквадратическому отклонению значений признака x_l .

Обобщением евклидова расстояния является расстояние Махаланобиса

$$d_{ij} = (x_i - x_j) \Sigma^{-1} (x_i - x_j)',$$

где $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$; Σ — ковариационная матрица связи признаков (размерности $n \times n$); ' — знак транспонирования. Используются и другие меры расстояния.

Выбор метрики определяется в основном структурой признакового пространства и целью классификации. Полностью формализовать этот этап решения задачи многомерной классификации пока не представляется возможным.

Для определения целевой функции классификации кроме меры сходства нужно задать еще критерий качества классификации — меру компактности.

Большинство мер компактности основаны на сравнении внутриклассовой и межклассовой дисперсии. Критерий ка-

чества классификации в этих случаях обычно строится как некоторая функция ряда параметров, характеризующих межклассовую и внутриклассовую структуры совокупности. Подробный обзор используемых критериев можно найти в работах [Котюков, 1984; Мандель, 1988].

Часто используются комбинированные критерии качества классификации, основанные на сочетании концепций «компактности» классов и максимальной «удаленности» их друг от друга и др.

Разные критерии качества (меры компактности), вообще говоря, могут дать различающиеся результаты классификации. Поэтому для получения более строгих данных относительно структуры классов желательно использовать различные критерии, а результаты разбиения сравнить.

Модели автоматической классификации (кластер-анализ, таксономия). В общем случае методы кластерного анализа (таксономии, автоматической классификации) решают задачу оптимального (с точки зрения некоторого критерия качества классификации T) разбиения исходного множества реализаций $V = \{x_i, i = \overline{1, m}\}$ на k подмножеств (кластеров, таксонов, классов) $\{V_v = \{x_{(v)i}; i = \overline{1, m_v}\}; v = \overline{1, k}\}$. Обычно величина k априорно неизвестна, известен лишь диапазон ее возможных значений $1 < k_1 \leq k \leq k_2 < m$.

Задачи кластерного анализа можно классифицировать разными способами. Для целей моделирования выделяются два основных классификационных признака: критерий разбиения и реализующие его алгоритмы. По первому признаку выделим три основных типа моделей автоматической классификации: дисперсионные, дискриминантные, задачи разделения смесей. Реализующие их алгоритмы можно разделить на детерминированные и статистические, хотя некоторые из них могут трактоваться как в одной, так и в другой интерпретациях. Статистические, в свою очередь, делятся на параметрические, непараметрические и асимптотические.

Детерминированные алгоритмы применяются в предположении четкой разделимости классов в признаковом пространстве, когда для каждого объекта существует строго однозначное (с вероятностью, равной единице) отношение к определенному классу.

В статистических алгоритмах предполагается, что каждый объект с некоторой вероятностью может принадлежать к любому из полученных классов. Решение в данной ситуации обычно выдается в виде набора вероятностей отнесения объекта к классам.

Как правило, для определенных моделей многомерной классификации предпочтительно использовать конкретные виды алгоритмов. Однако жесткой связи здесь нет.

В настоящее время предложено много различных критериев оптимальности T и алгоритмов решения задачи таксономии, написаны обзорные работы [Котюков, 1984; Мандель, 1988]. Рассмотрим некоторые наиболее популярные постановки и методы решения задач.

Большое разнообразие используемых исследователями критериев качества разбиения T объясняется либо отсутствием четкого (формализованного) представления о дальнейшем использовании результатов таксономии, либо сложностью использования такого формализованного представления на данном этапе исследований.

Учитывая сказанное, очевидно, целесообразно использовать те критерии T , интерпретация которых проста и естественна для специалиста.

Обычно требуется, чтобы в одну и ту же группу попадали объекты (реализации), «похожие» (по значениям признаков x) друг на друга и мало похожие на объекты других групп. Наиболее просто эти требования выражаются на языке так называемых дисперсионных критериев качества таксономии.

Очень часто в качестве критерия T используется средний по группам разброс реализации относительно «центра тяжести» групп (оценка математического ожидания группы).

Под «центром тяжести» v -й группы будем понимать $\bar{x}_{(v)} = \bar{x}_{1(v)}, \dots, \bar{x}_{n(v)}$, где $x_{j(v)} = \frac{1}{m(v)} \sum_{x_i \in V_v} x_{ij}$, $j = \overline{1, n}$. За-

метим, что при минимизации такого критерия происходит одновременно и максимизация среднего разброса «центров тяжести» групп относительно общего «центра тяжести» всей совокупности V .

Введем дополнительно еще одно понятие — «эталон». Под эталоном группы $V_{(v)}$ будем понимать тот из выборочных объектов группы $x_{i \in (v)} \in V_{(v)}$, суммарное расстояние от которого до других объектов группы минимально

$\sum_{x_i \in V_v} d_{i \in (v)} \rightarrow \min$, где $d_{i \in (v)}$ — расстояние от $x_i \in V_v$

до $x_{i \in (v)} \in V_v$. Нетрудно показать, что «эталон» является наиболее близким к «центру тяжести» объектом из $V_{(v)}$. Использование же понятия «эталон» вместо «центр тяжести» позволяет создать более эффективные алгоритмы оптимизации таксономии.

Ограничимся пока рассмотрением случая, когда число групп k фиксировано. Тогда дисперсионный критерий ка-

чества таксономии будет иметь вид

$$T_1 = \sum_{v=1}^k \sum_{x_i \in V_v} d_{i \in (v)}.$$

Минимизация T_1 позволяет автоматически выбрать и «эталон» в каждой из k групп.

Для случая большого m числа реализаций (объема выборки) может быть предложен следующий простой итерационный алгоритм, реализующий упомянутый выше критерий качества.

1. Задается произвольное начальное разбиение $\{V_v; v = \overline{1, k}\}$ всех объектов на k групп.

2. В группах $\{V_v\}$ определяются свои эталонные объекты.

3. Распределяются заново все m исходных объектов по группам $\{V_v\}$ согласно принципу — x_i относится к V_v , если расстояние от x_i до «эталона» V_v минимально, т. е. по принципу ближайшего «эталона».

4. Если объекты $\{x_i\}$ иначе распределились в группах, то пункты 2, 3 повторяются, в противном случае работа алгоритма заканчивается.

Нетрудно показать, что значение критерия T_1 на каждом шаге алгоритма лишь уменьшается. В силу ограничения $T_1 \geq 0$ итерационный процесс сходится за конечное число шагов. При этом достигается лишь локальный минимум T_1 , и многое зависит от результатов 1-го шага алгоритма.

Заметим, что рассмотренная схема задачи таксономии подходит и для решения задачи разбиения признаков $\{x_j\}$ на группы так, чтобы в одну и ту же группу попадали сильно коррелированные между собой признаки, а в разные группы — слабо коррелированные. Для этого можно положить $d_{ij} = 1 - |\rho_{ij}|$, где ρ_{ij} — коэффициент корреляции между x_i и x_j , и воспользоваться изложенными алгоритмами оптимизации.

В качестве критерия разбиения $\{V_v\}$ может быть взят суммарный дискриминантный критерий Уилкса для s ортогональных дискриминантных признаков [Андерсон, 1963]:

$$\left\{ z_l = \alpha'_l x = \sum_{j=1}^n \alpha_{lj} x_j, \quad l = \overline{1, s}, \quad 1 \leq s \leq (k-1) \right\};$$

$$T_2 = \sum_{l=1}^s W_l = \sum_{l=1}^s \frac{\alpha'_l \Sigma^b \alpha_l}{\alpha'_l \Sigma^o \alpha_l},$$

где Σ^b , Σ^o — оценки матриц ковариаций признаков соот-

ответственно для межгруппового и внутригруппового рассеяния реализаций, определенные на основе разбиения $\{V_v\}$. Рассмотрим метод максимизации T_2 . Предварительно сделаем ряд замечаний. Критерий T_2 переищем в виде

$$T_2 = \sum_{l=1}^s \sigma_l^{2(b)} / \sigma_l^{2(a)} = \sum_{l=1}^s \left(\sigma_l^2 - \sum_{v=1}^h m_v \sigma_{l_v}^{2(a)} \right) / \sum_{v=1}^h m_v \sigma_{l_v}^{2(a)},$$

где σ_l^2 — общий разброс (дисперсия) всех m реализаций на шкале признака $z_l = \alpha_l' \cdot x$, $\sigma_{l_v}^{2(a)}$ — собственный разброс (дисперсия) m_v реализаций группы V_v по признаку z_l относительно оценки математического ожидания группы V_v на шкале z_l . Величина σ_l^2 для z_l не зависит от разбиения $\{V_v\}$.

Итерационный алгоритм максимизации T_2 имеет следующий вид.

1. Задается начальное разбиение $\{V_v\}$ всех m объектов.
2. Согласно численному методу определяется система s ортогональных дискриминантных признаков $\{z_l = \alpha_l' x, l = \overline{1, s}\}$. Вычисляется значение T_2 . Исходные координаты $\{x_i\}$ всех m объектов пересчитываются в систему координат

$$\{z_l\} - \{z_i\} = \{z_{i1}, \dots, z_{is}, i = \overline{1, m}\}.$$

3. Перераспределяем все m реализаций $\{z_i\}$ по k группам согласно следующему принципу. Каждая реализация z_i относится к той группе, присоединение к которой дает наибольшее увеличение величины T_2 .

4. Выполнение пунктов 2, 3 повторяется до тех пор, пока распределение объектов по группам $\{V_v\}$ не стабилизируется.

Для алгоритма имеем монотонное возрастание значения T_2 и конечную сходимость к локальному максимуму критерия.

Следующая рассматриваемая здесь постановка задачи кластерного анализа является достаточно общей и связана с так называемой задачей разделения смесей. Каждой из k групп сопоставим некоторую генеральную совокупность объектов, определяемую своей плотностью распределения $f(x, \theta_v)$. Тогда исходная совокупность объектов $V = \{x_i, i = \overline{1, m}\}$ может рассматриваться как выборка из общей генеральной совокупности, определяемой следующей конечной смесью

$$f(x, \theta) = \sum_{v=1}^k \pi_v f(x, \theta_v),$$

где π_v — априорная вероятность v -й группы и $\sum_{v=1}^k \pi_v = 1$.

В параметрическом случае задача заключается в определении по V оценок параметров $\{\pi_v, \theta_v\}$. Для ее решения может быть использована итерационная процедура метода максимума правдоподобия.

Однако в прикладных исследованиях часто теоретический закон распределения неизвестен. Поэтому приходится прибегать к непараметрическим методам оценки плотности распределения. Непараметрическая оценка для функции плотности вероятности, построенная по данной выборке, имеет вид

$$f_m(x) = c(h) \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp \left\{ -\frac{1}{2h^2} (x_i - x_i^0) \Sigma^{-1} (x_i - x_i^0)' \right\},$$

где $c(h) = 1/((h\sqrt{2\pi})^{n+m} \sqrt{|\Sigma|})$; $n + m$ — размерность выборочного пространства; Σ — выборочная ковариационная матрица; h — некоторое положительное число из интервала $[0, 1]$, определяющее качество аппроксимации распределения и соответственно число классов.

Исходным для алгоритма является первоначальный признак $V^0 = \{x_1^0, \dots, x_m^0\}$. Алгоритм представляет собой итерационную процедуру, определяющую по признаку $V^t = \{x_1^t, \dots, x_m^t\}$ новый признак — $V^{t+1} = \{x_1^{t+1}, \dots, x_m^{t+1}\}$, по которому объекты более выразительно группируются в классы, чем по признаку V^t . Причем если по признаку V^0 каждая точка входит с весом $1/m$, то по признаку V^t каждая точка входит с некоторым весом p_i^t , где $0 \leq p_i^t \leq 1, i = \overline{1, m}$.

Одна итерация алгоритма состоит из 6 этапов.

1. Вычисление ковариационной матрицы связи признаков, составляющих V^t .
2. Вычисление меры связи между объектами.
3. Определение матрицы вероятности принадлежности объекта x_i к некоторому классу V_l .
4. Вычисление скорректированных априорных вероятностей принадлежности объектов к классам.
5. Определение преобразованного признака V^{t+1} .
6. Проверка критерия прекращения итерационного процесса.

При любом методе разбиения важно определить рациональное число классов. С этой точки зрения алгоритмы мно-

гомерной классификации можно подразделить на 3 группы: число классов априорно задано, число классов заранее не известно и определяется в процессе классификации, число классов априорно не известно, но его определение не входит в цели задачи (задачи построения «дерева» разбиений). Наиболее распространенной в экономико-статистических исследованиях является вторая ситуация. Как правило, априорно определить точное число классов в конкретных исследованиях не представляется возможным. Поэтому проводят разбиение на различное число классов (при разных параметрах) и выбирают разбиение, в наибольшей мере удовлетворяющее целям исследования. Выбор рационального числа классов (классификации) основывается как на формальных, так и на содержательных принципах.

§ 3. Некоторые проблемы исследования динамики производственных процессов

Учет структурных изменений. Традиционные приемы и методы статистического моделирования при динамичности процессов развития отдельных промышленных объектов не вполне отвечают требованиям адекватного описания изменяющихся во времени и пространстве связей между показателями и факторами производства. Поэтому в экономическом анализе и планировании ощущается острая необходимость поиска методов, приспособленных к описанию и прогнозированию процессов с изменяющейся структурой.

Коротко остановимся на понятии структуры производственного процесса. В содержательном смысле под структурой производственного процесса можно понимать оператор преобразования ресурсов в готовую продукцию, а в статистическом — характер связи между факторами производства и выходными технико-экономическими показателями.

Статистическая модель, описывающая этот преобразователь, как правило, характеризует зависимость между входами (факторами производства) и выходами (результатами производства) исследуемого экономического объекта, а также связи между входами объекта. Описываемый моделью способ преобразования ресурсов в продукцию может быть назван абстрактной технологией производства. Следовательно, под изменением структуры производственного процесса в промышленности следует понимать изменение абстрактной технологии, ее основных характеристик.

В любой статистической совокупности актов производства имеет место вариация технико-экономических показателей, изменяющих свое значение от одной реализации производственного процесса к другой.

Для целей методологического анализа вариацию экономических показателей можно подразделить на две части — «динамическую» и «структурную». Первая связана с изменением входа системы при сравнительно стабильной абстрактной технологии (преобразователе). Здесь экономико-статистическая модель имитирует воздействие на промышленный объект изменяющихся внешних условий его функционирования.

Вторая часть — «структурная» — связана с существенным изменением самой абстрактной технологии (переходом к другому типу преобразователя). Между этими двумя причинами изменчивости экономических показателей имеются принципиальные различия.

Применительно к выделенным ранее способам формирования совокупности актов производства (временной и пространственной) рассмотренную выше классификацию вариации показателей можно трактовать следующим образом.

При исследовании показателей работы отдельного объекта во времени наибольшее значение имеет динамическая вариация, так как большую часть периода своего развития объект остается «похожим» сам на себя. Однако в его функционировании имеется ряд периодов, когда происходит резкое изменение характеристик абстрактной технологии и, следовательно, изменяется характер статистической зависимости факторов и показателей производства. Обычно это наблюдается при переходе объекта от одного этапа развития к другому (освоение — стабильное функционирование — «старение»), при реконструкции, изменении природных условий, используемых видов сырья и топлива и т. д. Характерные черты временной выборки — непрерывность, сравнительная гладкость, относительная плавность переходов от одной абстрактной технологии к другой.

Совокупность пространственных реализаций (актов производства на различных объектах в фиксированный момент времени) отличается наличием различных типов абстрактных технологий и дискретностью (разрывностью) переходов от одного способа преобразования к другому.

Главными причинами изменчивости характера зависимостей во времени и пространстве являются: реализация достижений научно-технического прогресса, этапность развития объектов, изменение природных условий в добываю-

ших отраслях промышленности, различия в масштабах производства и уровне использования ресурсов, качество организации и управления производством, внешние условия функционирования экономического объекта.

Остановимся более подробно на характеристике некоторых причин изменения структуры связей экономических показателей.

В последние десятилетия главную, ключевую роль в экономическом развитии играет научно-технический прогресс. Характер его влияния на абстрактную технологию (эффективность преобразования ресурсов в продукцию), а следовательно, и на структуру модели зависит от типа и формы технического прогресса, масштаба изучаемого объекта, его положения на траектории развития и др.

Технический прогресс может быть капиталоемким, требующим существенных инвестиций и не требующим больших капитальных вложений. Последний проявляется в совершенствовании технологии, организации и управления производством.

Рассмотрим влияние этих двух форм технического прогресса на абстрактную технологию отдельного предприятия и совокупности промышленных объектов.

Для отдельного предприятия реальные возможности изменения абстрактной технологии зависят от положения рассматриваемого объекта на траектории развития. В период стабильного функционирования, когда производственные фонды освоены, возможности изменения масштабов и соотношений в затратах ресурсов весьма ограничены. Структура модели на таких участках траектории развития либо стабильна, либо меняется достаточно плавно.

Другая картина наблюдается при исследовании долгосрочной перспективы развития предприятия, когда возможности маневра значительно шире и могут реализоваться обе отмеченные выше формы технического прогресса. Например, в период проектирования возможности маневра очень велики, в период же строительства предприятия, его реконструкции, коренного изменения технологии и т. д. они меньше, но довольно существенны. Таким образом, долгосрочное развитие предприятия включает несколько абстрактных технологий и областей перехода от одной к другой. Такое развитие может быть корректно описано с помощью системы моделей с переменной структурой, под которой понимается совокупность ряда моделей, описывающих каждую разновидность абстрактной технологии (технический уровень), а также переходные периоды между ними. Длительность

переходного периода во многом определяется характером реализуемого технического прогресса.

Для совокупности объектов процесс изменения абстрактной технологии разновременен: отдельные объекты находятся на разных участках траектории развития, имеют различный технический уровень. Поэтому границы между технологическими периодами для системы в целом «смазаны». Степень размытости границ зависит от числа объектов в системе. Чем их больше, тем более растянуты переходные периоды и тем плавнее траектория развития. Однако если систему рассматривать на уровне объектов, то получим совершенно иную картину. В каждый фиксированный момент времени отдельные объекты имеют определенный технический уровень, и переходы от объекта к объекту (от типа к типу) дискретны.

Вторая важная причина изменения структуры связей показателей и факторов производства во времени — это предыстория развития и функционирования объектов.

Углубленно история развития объекта включает следующие стадии: проектирование, строительство, эксплуатацию. Каждой крупной стадии соответствуют свои характерные задачи исследования, степени свободы изменения масштабов и соотношений факторов производства, а следовательно, и специфические формы моделей. Далее, каждый период эксплуатации объекта характеризуется различным набором переменных, влияющих на моделируемый показатель, неодинаковой ролью отдельных переменных и разной скоростью изменения показателей во времени. Для каждого из перечисленных выше периодов развития промышленного объекта характерны своя динамика экономических показателей и специфические функции преобразования затрат ресурсов в продукцию. Как правило, первый и третий периоды характеризуются быстрыми темпами изменения экономических показателей во времени и сравнительно низкой эффективностью производственного процесса, второй — относительно медленными темпами изменения экономических показателей и наиболее высоким уровнем эффективности. Поэтому и структура моделей в эти периоды должна быть различной.

Следующая причина нестабильности структуры влияния переменных во времени — это изменение природных факторов. Особенно отчетливо данное обстоятельство проявляется в добывающих отраслях промышленности. Понятие «природные факторы» весьма широко — оно охватывает все элементы окружающей природы, оказывающие влияние

на эффективность производственной деятельности промышленных объектов. Их можно подразделить на две основные группы: непосредственно участвующие в материальном производстве, (естественные ресурсы) и не участвующие в производстве, но влияющие на его результаты (природные условия). К наиболее динамичным переменным относятся — качество естественных ресурсов, а также та часть природных условий, которая характеризует горно-геологические факторы добычи естественных ресурсов. С течением времени они претерпевают определенные изменения, в основном в сторону ухудшения параметров (увеличивается глубина залегания, уменьшаются запасы, снижается пластовое давление, увеличивается обводненность и т. д.).

В последние годы весьма динамичными стали внешние условия функционирования предприятия (набор директивных планируемых показателей, форма кредитования, договорные отношения между поставщиками и потребителями и т. д.), а также формы организации и оплаты труда на предприятии (коллективные формы организации и стимулирования труда, изменения в системах премирования и т. д.). Эти изменения также оказывают весьма существенное влияние на структуру связей.

В зависимости от того, учитывается или не учитывается изменение структуры производственных процессов, экономико-статистические модели можно подразделить на два крупных класса — на экономико-статистические модели со стабильной и переменной структурой*.

Для ЭСМ со стабильной структурой характерно описание будущих состояний объекта при помощи экстраполяции закономерностей его поведения в прошлом. При построении ЭСМ такого типа принимается, что поведение производственной системы на всем анализируемом отрезке времени описывается одним и тем же случайным процессом. Это равносильно предположению о постоянстве ее свойств во времени. В основе корректного применения ЭСМ со стабильной структурой лежит одна из характерных особенностей производственных систем — их инерционность, невозможность существенного изменения состояния системы за малые промежутки времени.

Модели с переменной структурой учитывают возможные структурные изменения изучаемого объекта. Использование

ЭСМ с переменной структурой соответствует принятию гипотезы об изменяющейся во времени эффективности использования производственных ресурсов.

Выбор того или иного типа модели для описания конкретного процесса зависит от степени его инерционности и управляемости. Естественно, что модели с переменной структурой являются более общим классом экономических моделей, включающим в себя и модели со стабильной структурой. Однако, несмотря на большую универсальность моделей с переменной структурой, они не исключают использования первого типа моделей. Дело в том, что модели со стабильной структурой, реализующие гипотезу о стационарном или о приводимом к стационарному случайном процессе, отличаются сравнительно простой конструкцией. Если гипотеза о стационарности случайного процесса подтверждается, то применение моделей со стабильной структурой достаточно эффективно.

Построение моделей с переменной структурой — один из основных путей повышения адекватности моделей реальным процессам. Однако при этом необходимо учесть возрастающие сложности конструкции модели в связи с введением требований изменчивости структуры. Поэтому в каждом конкретном случае выбранная форма модели является воплощением необходимого компромисса между ее содержательными, конструктивными и потребительскими свойствами.

При построении статистических моделей с переменной структурой помимо обычных этапов экономико-статистического исследования возникают дополнительные задачи. Прежде всего, необходимы какие-либо содержательные предпосылки для выдвижения гипотезы о наличии изменений в структуре влияния в исследуемой совокупности. Если есть основания для выдвижения такой гипотезы, то следующий этап — формальная проверка гипотезы. В зависимости от цели исследования, характера исходной информации, степени формализуемости, уровня алгоритмической и программной обеспеченности выбирается определенный метод исследования. При подтверждении гипотезы о наличии структурных изменений необходимо выявить области изменения структур и характер этого изменения. Что касается областей (точек) структурных изменений, то здесь возможны следующие ситуации: а) точки (области) априорно заданы исходя из содержательных представлений о моделируемом процессе; б) расположение точек (областей) структурных изменений неизвестно и их необходимо найти на основе анализа выборочных значений.

* Под структурой ЭСМ понимается набор входных и выходных переменных, форма их взаимосвязи, параметры модели.

В том и другом случае для выбора метода конструирования ЭСМ необходимо исследовать характер перехода от одной структуры влияний к другой. Теоретически можно рассмотреть два крайних случая: а) наблюдаемый структурный сдвиг имеет гладкий плавный характер, и переходный режим может быть описан непрерывной функцией; б) структурный сдвиг носит качественный характер, является скачкообразным, а переход описывается разрывной функцией. В прикладных исследованиях, как правило, имеют место некоторые смешанные переходные режимы с преобладанием того или иного характера перехода.

После уяснения перечисленного круга вопросов создаются предпосылки для выбора адекватного подхода к решению основной задачи — построения модели с переменной структурой.

Общая форма регрессионной модели с переключениями. Одной из наиболее разработанных форм ЭСМ с переменной структурой, позволяющей учитывать структурные изменения, являются линейные регрессионные модели с переключениями, которые, по существу, являются кусочно-линейными.

Кусочно-линейные модели обладают рядом положительных качеств, выгодно отличающих их от других, нелинейных моделей:

просты при интерпретации и использовании специалистом; требуют сравнительно небольшого объема выборочных данных для «надежной» оценки параметров;

разработаны эффективные численные методы их оптимизации на основе анализа данных, позволяющие одновременно осуществлять и выбор информативной подсистемы исходных показателей, и учет разнотипности последних.

Применение кусочно-линейных моделей позволяет получить высокую точность описания и прогнозирования на их основе процессов с изменяющейся структурой.

Рассмотрим общую форму и некоторые понятия, характеризующие линейные регрессионные модели с переключениями. Пусть описание любого объекта задается на языке значений «входных» признаков $X = \{X_1, \dots, X_n\}$. Тогда каждое конкретное описание $x = (x_1, \dots, x_n)$ есть точка в n -мерном признаковом пространстве R_x . «Выходной» результирующий показатель будем обозначать Y , а его конкретное значение — y . Моделью показателя Y является некоторый функционал $Y^* = q(X, \theta)$, позволяющий на основе значения x получать прогнозируемое значение y^* . Здесь θ — вектор параметров.

Модель с переменной структурой есть преобразование $Y^* = q(X; \theta(X))$, где вектор параметров θ сам является функцией от X .

Такая модель должна строиться на основе анализа выборочной информации V , являющейся совокупностью m различных реализаций (y, x) :

$$V = \{(y_i, x_i); i = \overline{1, m}\}.$$

Если одним из параметров, например X_n , является время T , то модель будем называть динамической, в противном случае — статической.

В приведенной общей форме регрессионной модели с переключениями можно выделить следующие основные элементы: подмножество переключающихся переменных X_n ; число фаз (режимов) переключения; правило переключения с режима на режим.

Можно отметить следующие характерные свойства регрессионной модели с переключениями:

для каждой фазы переключения множество экзогенных переменных X и структурный вектор параметров $\theta(X)$ постоянны;

на разных фазах либо множество экзогенных переменных X , либо структурный вектор $\theta(X)$, либо оба элемента модели различны.

Выбор конкретной формы регрессионной модели с переключениями, а также способа оценивания неизвестных параметров (структурный вектор, точки переключения режимов) определяется свойствами ее основных элементов и характером выборки. В первую очередь это определяется свойствами переключателя. Априорный содержательный анализ моделируемого процесса позволяет выдвинуть гипотезу о предполагаемом наборе переключающихся параметров и размерности переключателя.

Существенные различия в процедуре оценивания параметров модели обуславливаются размерностью переключателя (одномерный или многомерный). В случае одномерного переключателя в задачу оценивания параметров входят проверка гипотезы о наличии структурных неоднородностей в моделируемом процессе и, если неизвестны точки переключения, их определение на основе имеющейся статистической выборки. В случае многомерного переключателя помимо двух перечисленных задач возникает дополнительная: выделение из общего набора экзогенных переменных подмножества переключающихся и построение функции переключения.

Существенно влияет на способ построения модели тип перехода с режима на режим. Здесь следует выделить две ситуации. В первой из них моделируемый процесс непрерывен и переходы с режима на режим являются гладкими. С точки зрения процедуры оценивания параметров регрессии с переключением отмеченное обстоятельство равносильно введению дополнительного ограничения на непрерывность функции в области определения. В другой ситуации природа исследуемой совокупности может быть такова, что переходы с режима на режим являются скачкообразными, а во многих случаях по переключающим параметрам допустимое множество дискретно.

Наконец, способ построения модели с переключением зависит от выбора правила переключения режимов. Существуют два основных правила переключения: детерминированное и стохастическое. Детерминированное правило обычно используется в ситуации, когда границы между фазами переключения четко выражены (особенно в случае упорядоченных временных рядов).

Перечисленные моменты определяют как тип используемой регрессионной модели с переключением, так и способ ее построения.

Одномерный переключатель. Если выбран одномерный переключатель, допустимы скачкообразный переход с режима на режим и детерминированное правило переключения, то имеем случай переключающейся регрессии с одномерным экзогенным типом переключения без ограничения непрерывности:

$$\begin{cases} y_t = x_{it}^T \alpha_i + \varepsilon_{it}, & t \in I_i; \\ I_i = \{t: \pi_{i-1}^* \leq \pi_t^* \leq \pi_i^*\}, & i = \overline{1, k}, \end{cases}$$

где t пробегает значения от 1 до n и образует исходный индексный интервал $[1, \dots, n]$; y_t — значение эндогенной переменной в момент t ; x_{it} — значение вектора экзогенных переменных, имеющего размерность m_i ; i — номер режима (фазы); k — общее число фаз; α_i — вектор структурных коэффициентов; ε_{it} — случайное отклонение; I_i — фазы постоянства структуры; π_t^* — наблюдаемая детерминированная переменная; π_{i-1}^*, π_i^* — неизвестные параметры.

В приведенной модели переключающейся регрессии искомыми являются вектор структурных параметров $\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_k$ и разбиения $\hat{I}_1, \dots, \hat{I}_k$. Для одновременного поиска параметров разбиения I и структурного вектора α воспользуемся

методом наименьших квадратов [Строев, 1981]. Сущность его сводится к решению следующей экстремальной задачи:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{t \in I_i} (y_t - \alpha_i^T x_{it})^2 \rightarrow \min_{\substack{\alpha_1, \dots, \alpha_k \\ I_1, \dots, I_k}},$$

где минимизация по I_i осуществляется на множестве допустимых разбиений, т. е. при ограничениях, вытекающих из специфики правила переключения. Для сформулированной задачи допустимое разбиение определяется ограничениями:

$$\max_{t \in I_i} \pi_t < \min_{t \in I_{i+1}} \pi_t, \quad i = \overline{1, k-1}.$$

При решении задачи оценивания параметров необходимо на основе априорного анализа задать число фаз (режимов) переключения, набор экзогенных переменных на каждой фазе, переменную, по которой производится переключение.

Рассмотренная регрессионная модель с переключением и способ оценивания ее параметров наиболее приемлемы для временных выборок или для упорядоченных одномерных рядов (по производственной мощности, географической координате и т. п.).

Задача сильно упрощается, когда априори известны точки структурных изменений π_{i-1}^*, π_i^* . В этом случае нет необходимости в оценивании точек структурных изменений, а следует лишь проверить гипотезу о существенности структурных изменений в заданных точках.

Подобная ситуация (скачкообразное переключение) имеет место, например, при одномоментном переходе на новые формы организации и стимулирования труда, радикальном изменении технологии, исходного сырья и т. п. Во всех этих случаях наблюдаются скачки и разрывы зависимостей от времени.

Поиск точек переключения. До сих пор предполагалось, что число фаз (режимов) переключения известно. В противном случае задача значительно усложняется. Один из возможных подходов к ее решению может быть основан на методах поиска структурных изменений в линейной регрессии [Розин и др., 1984; Brown, Durbin, 1975; Schweder, 1976]. В качестве примера рассмотрим один из дисперсионных методов проверки гипотезы о наличии перелома зависимости.

По своему содержанию процедура выделения периодов со стабильной структурой связей во многом совпадает с проб-

емой анализа устойчивости параметров моделей, построенных на базе временных рядов. Идея данной процедуры заключается в последовательном увеличении длины (или перемещении во времени) информационной базы, на которой строится модель одной и той же структуры, с анализом идентичности полученных на каждом шаге оценок параметров. Если на каком-то шаге наблюдаются статистически значимые различия в оценках параметров модели, то это является сигналом о возможном резком изменении структуры влияния.

Для проверки устойчивости во времени значений параметров модели можно использовать методы проверки идентичности двух или нескольких регрессий. Проверяются следующие гипотезы относительно величины коэффициентов регрессий (b) и свободного члена (a):*

1) $a^{(1)} = a^{(2)}$, $b^{(1)} = b^{(2)}$ — регрессии идентичны по сдвигу и наклону;

2) $a^{(1)} \neq a^{(2)}$, $b^{(1)} = b^{(2)}$ — регрессии различаются только по сдвигу;

3) $a^{(1)} = a^{(2)}$, $b^{(1)} \neq b^{(2)}$ — регрессии различаются по наклону;

4) $a^{(1)} \neq a^{(2)}$, $b^{(1)} \neq b^{(2)}$ — регрессии различны по сдвигу и наклону.

Гипотеза об идентичности двух уравнений регрессии (или что то же, об отсутствии структурного изменения) может проверяться методом, применяемым к общим линейным гипотезам.

При верной нулевой гипотезе статистика $F = (S_1 - (S_2 + S_3))(n + m - 2p) / (S_2 + S_3)p$ имеет F -распределение с p и $(n + m - 2p)$ степенями свободы, где S_1 — сумма квадратов отклонений от регрессии, рассчитанной по объединенной совокупности $(n + m)$ наблюдений; S_2 — сумма квадратов отклонений от регрессии, рассчитанной по выборке из n наблюдений; S_3 — сумма квадратов отклонений от регрессии, рассчитанной по m наблюдениям; p — число оцениваемых параметров регрессии.

Полученное значение F сравнивается с соответствующим табличным значением критерия Фишера для фиксированного уровня значимости α и числа степеней свободы p и $(n + m - 2p)$. Если $F > F_{p, n+m-2p}^{\alpha}$, то гипотеза об идентичности регрессии для двух групп наблюдений отвергается.

* Индексы (1) и (2) означают принадлежность к первой и второй выборкам соответственно.

Метод имеет тот недостаток, что в случае, если нулевая гипотеза отвергается, неизвестно, чем обусловлено различие уравнений регрессии — их сдвигом или различием коэффициентов регрессии (и каких именно).

В случае временных рядов проверка гипотез сводится к образованию непрерывных сегментов и проверке идентичности уравнений, построенных по этим сегментам. Поскольку минимальная величина сегмента m определяется числом параметров и равна $p + 1$, точка перелома зависимости при больших p находится в пределах некоторого достаточно протяженного временного отрезка. Для ее локализации может быть использован прием, основанный на смещении точек начала отсчета интервалов. Однако имеется дополнительная трудность, связанная с произвольностью выбора крайних точек отсчета для первоначального интервала. Кроме того, выбрав первоначальный интервал, мы априори предполагаем отсутствие на нем точек перелома зависимости.

Линейные и кубические сплайн-функции. В ряде случаев при исследовании производственных процессов более целесообразно описание их непрерывными функциями. Это имеет место на стационарных участках траектории развития предприятия, при описании непрерывных производственных процессов на крупных технологических агрегатах и т. д. Чаще всего такая ситуация встречается при исследовании работы отдельного производственного объекта во времени. В этом случае при построении регрессионной модели с переключениями требуется соблюдение условия непрерывности в точке переключения. Введение данного условия приводит к необходимости построения регрессионного сплайна.

Воспользуемся следующими определениями [Пуарье, 1981].

Сеткой называется произвольное множество точек оси абсцисс $\Delta = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{k-1}\}$, где $\bar{x}_1 < \bar{x}_2 < \dots < \bar{x}_{k-1}$. Точки \bar{x}_j ($j = 1, k - 1$) называются внутренними узлами или просто узлами.

Будем говорить, что y^* является линейным сплайном $S_{\Delta}(x)$ над Δ тогда и только тогда, когда y^* есть непрерывная кусочно-линейная функция от x , график которой состоит из k прямолинейных отрезков, расположенных над k интервалами $(-\infty, \bar{x}_1]$, $[\bar{x}_1, \bar{x}_2]$, ..., $[\bar{x}_{k-1}, \infty)$. Входящие в Δ узлы называются также точками перелома, или точками стыковки.

Определим k новых переменных:

$$\omega_1 = x; \quad \omega_j = (x - \bar{x}_{j-1})_+ = \max(x - \bar{x}_{j-1}, 0) = \begin{cases} x - \bar{x}_{j-1}, & x > \bar{x}_{j-1}; \\ 0, & x \leq \bar{x}_{j-1}, \end{cases}$$

где $j = 2, 3, \dots, k$. Тогда линейный сплайн записывается следующим образом: $S_\Delta(x) = \beta_0 + \beta_1\omega_1 + \beta_2\omega_2 + \dots + \beta_k\omega_k$, где β_1 — коэффициент наклона сплайна над первым интервалом, а каждый следующий коэффициент β_j ($j = 2, \dots, k$) показывает изменение углового коэффициента при переходе от $(j-1)$ -го интервала к j -му. На рис. 2.1 приведен пример кусочно-линейного сплайна с тремя узлами ($\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$).

Использование линейного сплайна предполагает существование некоторой линейной зависимости, претерпевающей в узлах структурные изменения. Если же аппроксимируемая зависимость существенно нелинейна, то для более «гладкого» и гибкого описания используются кубические многочлены. Если в узлах сетки кубический многочлен меняет структуру, то получаем так называемый кубический сплайн, математическую формулировку которого см. [Альберг и др. 1972].

Для таких сплайнов сетка определяется как множество точек оси абсцисс $\Delta = \{\bar{x}_0, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_k\}$ на отрезке $[\bar{x}_0, \bar{x}_k]$, а каждая из $(k+1) \geq 3$ точек x_j ($j = 0, 1, \dots, k$) — узлом. Пусть $y = \{y_0, y_1, \dots, y_k\}$ — набор соответствующих значений ординат. Кубическим сплайном над Δ , интерполирующим набор y , называется функция $S_\Delta(x)$ такая, что:

1) $S_\Delta(x)$ и ее первая и вторая производные непрерывны на $[\bar{x}_0, \bar{x}_k]$;

2) $S_\Delta(x)$ на каждом интервале $[\bar{x}_{j-1}, \bar{x}_j]$ ($j = 1, 2, \dots, k$) совпадает с некоторым многочленом степени не больше трех;

3) $S_\Delta(\bar{x}_j) = y_j$ ($j = 0, 1, \dots, k$).

Условия непрерывности удовлетворяются путем наложения на сплайн граничных условий в конечных узлах \bar{x}_0 и \bar{x}_k . Эти условия могут быть введены различными способами.

Общий вид кусочно-кубического сплайна для отрезка $[x_{j-1}, x_j]$

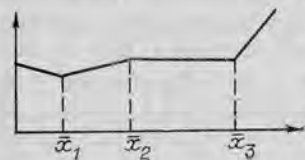


Рис. 2.1. Кусочно-линейный сплайн

можно представить следующим образом:

$$S_\Delta(x) = a_j + b_j(x - \bar{x}_{j-1}) + c_j(x - \bar{x}_{j-1})^2 + d_j(x - \bar{x}_{j-1})^3,$$

где неизвестные параметры a_j, b_j, c_j и d_j находятся с учетом условий 1—3.

Задача аппроксимации с точными условиями (вектор ординат y известен) решается с помощью системы линейных уравнений, матрица коэффициентов которой имеет трехдиагональную форму. Сложности возникают при построении статистической модели, включающей кубический сплайн. В этом случае вектор ординат $y = \{y_0, y_1, \dots, y_k\}$ неизвестен, он определяется методом наименьших квадратов.

Кубические сплайны нашли широкое распространение в задачах аппроксимации экспериментальных данных, потому что они являются «самыми гладкими» функциями, проходящими через данные точки (свойство наилучшего приближения, см. [Альберг и др., 1972]).

Особое значение при сглаживании эмпирических кривых имеют сплайны, сохраняющие непрерывность и выпуклость кривых, так называемые изогеометрические сплайны [Воронин, 1987].

Использование сплайн-функции при конструировании моделей с переменной структурой представляется полезным и целесообразным в ситуациях, когда исследуется одномерный случай (изменение одного показателя, обусловленное изменением другого показателя) или рассматриваемая зависимость не имеет скачков и разрывов.

Следует однако, отметить, что аппарат сплайн-функций значительно усложняется с увеличением размерности модели. Кроме того, при использовании сплайн-функций резко повышается значимость проверки гипотезы о наличии структурных изменений, поскольку построение сплайна осуществляется при фиксированных узлах «сшивания». Определение же значимости структурных сдвигов для любых ситуаций в настоящее время еще затруднительно.

Вследствие этого методы построения сглаживающих сплайнов не нашли пока широкого применения в задачах многомерной статистики, но могут эффективно использоваться в задачах одномерного и двумерного анализа.

При построении сплайнов в одномерных временных выборках следует различать два случая:

точки переключения режимов известны, а следовательно, их можно идентифицировать с узлами сплайн-функции; точки переключения режимов неизвестны.

В одномерных временных выборках первый случай довольно распространен, так как исходя из визуального анализа графиков временных рядов можно выдвинуть априорные гипотезы о числе, характере и расположении точек переключения. Формальные методы в данном случае являются средством проверки существования выдвинутых гипотез.

Отметим, что линейный сплайн удобно использовать как составную часть множественной линейной регрессии относительно неизвестных параметров β_j ($j = 0, 1, \dots, k$). Последнее связано с тем, что на параметры β_j не накладывается никаких ограничений; коэффициенты β_j имеют t -распределение, и можно определить статистическую значимость изменения коэффициента наклона при переходе от $(j-1)$ -го к j -му интервалу. Значимое отличие β_j от нуля свидетельствует о том, что в узле x_{j-1} происходит «структурное изменение».

Построение линейного одномерного сплайна с k узлами равносильно построению множественной регрессии с k факторами, где роль отдельных факторов играют преобразованные переменные.

В более общем случае сплайн-функция может выступать как часть статистической модели, описывающая действия фактора времени. Тогда экономико-статистическая модель может быть представлена в следующем виде:

$$y^*(t) = a_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_j + \sum_{i=1}^p \beta_i (t - t_{i-1}) + \varepsilon_t,$$

где a_0 — свободный член уравнения регрессии; $\sum_{j=1}^m b_j x_j$ — факторная часть регрессионной модели; $\sum_{i=1}^p \beta_i (t - t_{i-1})$ — кусочно-линейный сплайн с p узлами; ε_t — случайный остаток.

Построение кусочно-линейного сплайна в случае неизвестных точек перелома в одномерных временных выборках. Естественный путь в этой ситуации — включение всех предположительных точек перелома в качестве узлов, построение кусочно-линейного сплайна и оценка значимости коэффициентов модели с помощью t -критерия Стьюдента. Если один (или более) коэффициент оказывается незначимым, то исключается узел, в котором соответствующий β -коэффициент имеет наименьшую значимость. Строится сплайн по оставшимся узлам и процедура повторяется до тех пор, пока все β -коэффициенты не будут значимыми.

Описанная процедура, являясь наглядной и легко реализуемой, в то же время не совсем строга, поскольку она требует включения всех предположительных точек перелома, а это при ограниченной выборке является затруднительным. Кроме того, процедура существенно зависит от порядка исключения незначимых коэффициентов. По существу, она представляет собой аналог метода пошаговой регрессии.

Разработка более тонких и строгих приемов поиска точек перелома зависимости является предметом активных поисков.

Многомерный переключатель. Ранее рассмотренные ситуации построения регрессионных моделей с переключениями характеризовались одномерным переключателем режимов, и оценивание элементов этих моделей (структурных параметров и переключателя) проводилось с помощью той или иной модификации метода наименьших квадратов (шаговая регрессия, регрессия с переключениями, регрессия с фиктивными переменными и т. д.). Для пространственных и пространственно-временных выборок, где, как правило, имеется множество объектов, группирующихся в определенные типы, отличающиеся по некоторому набору признаков, и изменение зависимости выходного показателя от факторов производства не носит непрерывного характера, необходима разработка специальных методов построения многомерного переключателя режимов. Эта задача, по существу, сводится к разбиению выборочной совокупности на такие классы, в которых зависимость моделируемого показателя от факторов производства стабильна и линейна. Данное обстоятельство обуславливает широкое использование синтеза идей и методов многомерной классификации и регрессионного анализа при построении многофакторных кусочно-линейных моделей.

При этом с помощью методов многомерной классификации определяется оптимальный набор переменных многомерного переключателя и вводится оптимальное правило переключения (разделяющая функция). В литературе (см. [Котюков, 1984; Розин и др., 1984]) описан опыт использования большого числа алгоритмов построения многофакторных кусочно-линейных моделей. Они могут быть классифицированы по двум основным признакам: способу оценивания параметров переключателя и структурного вектора внутриклассовых регрессионных моделей и виду переключающей функции.

По первому признаку алгоритмы построения многофакторной кусочно-линейной модели можно подразделить на три типа:

методы предварительного кластерного анализа. в которых определяется разбиение выборочной совокупности на классы (определяется переключатель), а для найденного разбиения находится оптимальный структурный вектор. Эти методы могут давать удовлетворительное решение, но не позволяют обосновать достижение глобального экстремума качества модели. Они дают хорошие результаты в тех случаях, когда в выборочной совокупности существуют «компактные» и «изолированные» классы;

итерационные методы, заключающиеся в последовательном корректировании параметров переключателя и структурного вектора с помощью процедур кластерного и регрессионного анализа с целью повышения качества кусочно-линейной модели, при этом некоторое начальное разбиение задается;

единый оптимизационный процесс поиска наилучших параметров переключателя и вектора структурных коэффициентов. Здесь может быть получен глобальный оптимум функции качества модели, однако эта группа методов заведомо сложнее первых двух.

По виду переключающей функции алгоритмы построения многофакторных кусочно-линейных моделей подразделяются на детерминированные и стохастические. Стохастический подход целесообразно использовать в тех случаях, когда границы между классами (фазами переключения) размыты и имеются переходные состояния.

В настоящее время в практических исследованиях наибольшее распространение получили алгоритмы итерационного типа, сравнительно просто реализуемые и позволяющие получить приемлемое качество моделей.

Типизация экспериментальных кривых. Экспериментальные кривые представляют собой специальный вид информации, особенности которой заключаются в том, что единицей совокупности является многомерный вектор, упорядоченный по временной координате [Браверман, Мучник, 1983]. Такая форма представления исходной информации весьма характерна для непрерывных или периодических производственных процессов. Действительно, различные параметры ведения процессов либо фиксируются непрерывно в виде осциллограмм измерительных приборов, либо периодически фиксируются операторами или приборами.

В этом случае исходные данные, подлежащие обработке, представляют собой матрицу, строки которой соответствуют объектам (кривым), а столбцы — параметрам (ординатам кривых).

Однако такая трактовка игнорирует две существенные особенности данных этого типа — их линейную упорядоченность по оси аргумента кривых и многообразие возможностей представления информации, содержащейся в кривой (как следствие большого числа различных систем признаков для их характеристики, найденных опытным путем специалистами-прикладниками, а также выработанных специалистами по методам анализа кривых).

Выбор тех или иных методов представления информации о кривой связан с гипотезой о том, как «распределена» эта информация по кривой. В этом и состоит основное своеобразие данных.

Так, если можно считать, что информация распределена «равномерно» вдоль кривой и поэтому характеризуется поведением кривой в целом (например, ее спектральным составом, скоростью роста и т. п.), то для извлечения такой информации естественно использовать интегральные методы, включающие одновременно обработку всех параметров, задающих кривую.

В качестве примера можно привести методы получения обобщенных коэффициентов Фурье при разложении кривой по различным системам функций.

Совершенно иные методы извлечения информации необходимы в том случае, когда предполагается, что она содержится в отдельных относительно небольших участках кривой. Так, информация о составе химического соединения содержится в определенных участках различного рода спектрограмм. В этом случае в процессе извлечения информации нужно произвести выделение указанных «информативных» участков на каждой кривой и классифицировать их, а представление информации о кривой в целом следует строить через описание классов выделенных участков.

Рассмотрим подробнее типизацию кривых по их интегральным характеристикам. В качестве таких характеристик могут выступать, например, средние темпы роста функции, средний прирост на рассматриваемом интервале, автокорреляционная функция и др. Имея такие интегральные характеристики кривых или их отдельных сегментов, можно типизировать кривые (участки кривых). Исходя из полученной типологии можно затем методами многомерного статистического анализа выявить факторы, определяющие тип кривой а также влияние типа кривой на технико-экономические показатели производства. Результатом такого анализа является построение экономико-статистической модели, одним

из элементов которой является типология кривых, представляющих производственный процесс.

Одной из наиболее информативных форм представления кривых, описывающих поведение биохимических, физико-химических и других периодических процессов, являются их частотные характеристики. Определение их величины является предметом спектрального анализа.

Остановимся кратко на основных положениях теории спектрального анализа временных рядов.

Разработанный для задач астрономии, физики, радиотехники спектральный анализ все шире применяется для исследования случайных процессов и в других областях знаний. Он представляет собой математически строгий способ выявления скрытого механизма развития процесса. Спектральный анализ дает частотное разложение процесса и тем самым позволяет отделить систематические колебания, присущие процессу, от случайных скачков, оценить их период и степень влияния на динамику процесса.

В реальных процессах находят отражение как закономерности, так и случайности. В динамических рядах это проявляется в виде резких колебаний с постоянно меняющимся периодом и амплитудой, накладывающихся на основную тенденцию развития.

Функция (ряд) называется периодической, если она повторяет свои значения через определенный интервал времени — период. Будем называть процесс медленным, если его период велик (частота мала), и быстрым, если период мал (частота велика). Безусловно, реальные процессы не есть сумма строго периодических составляющих, но часто, если рассматривать их всплески в среднем по периоду, в случайностях проявляется закономерность, близкая к строгой периодичности. Спады и подъемы, «панизанные» на основную тенденцию, оказываются суммой составляющих гармоник, периодических в среднем по некоторому интервалу частот с постоянными в среднем амплитудами и фазами.

Под анализом временного ряда понимается оценка и восстановление по данной реализации свойств порождающего процесса, лежащего в основе этого ряда. Задача аналогична извлечению случайной выборки из генеральной совокупности и попытке затем оценить свойства генеральной совокупности по выборке. В обоих случаях ясно, что чем проще свойства, которые пытаются обнаружить, и чем полнее имеющаяся информация, т. е. чем больше длина реализации, тем больше шанс иметь корректно решаемую задачу. Польза такого анализа состоит в обнаружении или указании воз-

можных законов, которым может подчиняться переменная величина, и в появлении возможности прогнозирования.

Предположим, что рассматривается отрезок конечной длины отдельного выборочного ряда (т. е. какой-то ряд, порожденный процессом x_t , $t = 1, N$). Тогда этот конечный ряд можно безошибочно представить конечным рядом Фурье:

$$x_t(N) = \sum_{j=0}^N a_j \cos(\omega_j t) + \sum_{j=1}^N b_j \sin(\omega_j t),$$

где $\omega_j = 2\pi j/N$ и коэффициенты a_j и b_j выбраны так, чтобы выполнялись равенства $x_t(N) = x_t$ при $t = 1, 2, \dots, N$.

Если предположить, что $N \rightarrow \infty$, т. е. рассмотреть, как может быть устроен ряд Фурье, чтобы он годился для всего выборочного ряда, то прежде всего мы должны отметить, что $\omega_{j+1} - \omega_j \rightarrow 0$, а следовательно, ряд становится интегралом, и справедливо следующее представление:

$$x_t = \int_0^{\pi} a(\omega) \cos(\omega t) d\omega + \int_0^{\pi} b(\omega) \sin(\omega t) d\omega.$$

Если ряд $\{x_t\}$ содержит периодическую составляющую периода m (и, следовательно, частоту $\omega_1 = 2\pi/m$), то $a(\omega)$, $b(\omega)$ будут иметь острый пик при $\omega = \omega_1$; если же $\{x_t\}$ не содержит периодических компонент, то графики $a(\omega)$, $b(\omega)$ будут пологими.

Если бы для выборочного временного ряда заранее знать частотные функции $a(\omega)$ и $b(\omega)$, связанные с этим рядом, то все будущие значения были бы точно известны. Однако их нельзя оценить до тех пор, пока неизвестен «завершенный» бесконечный ряд. А так как довод этот очень важен, то возникает вопрос, что же мы можем оценивать, зная только конечный отрезок выборочного ряда.

Завершенную линию «поведения» от начала до конца процесса можно было бы представить совокупностью соответствующих рядов Фурье по времени. Хотя линия «поведения» процесса, вероятно, подвержена случайным воздействиям, главные изменения, по-видимому, управляются законами, правилами или обстоятельствами, которые не изменяются. В действительности линия «поведения» процессов, проводимых в производственных условиях, будет содержать большое количество регулярных, псевдопериодических движений. Если мы имеем выборочную реализацию «поведения» процесса, то мы можем попытаться оценить эти регулярности и предсказать его поведение в некоторый будущий момент

времени. Такой прогноз будет предполагать, конечно, что законы и обстоятельства будут продолжать действовать и в будущем.

Предположение о стационарности, о котором мы говорили, есть, по существу, предположение, что вся анализируемая выборочная реализация была подчинена одним и тем же «правилам движения». По реализации мы пытаемся оценить те регулярности или частоты, которые кажутся наиболее важными, а затем мы можем воспользоваться этими оценками, чтобы предсказать будущие значения переменной, предполагая, что продолжают действовать те же самые «правила движения».

Разложение в ряд Фурье на практике является неудобным для анализа структуры ряда, так как реальный процесс является смесью регулярных и нерегулярных гармоник (имеется в виду, что на наблюдаемом интервале времени меняются период и амплитуда циклических составляющих), что приводит к большой зазубренности гистограммы и практической невозможности выделить наиболее существенные компоненты.

Для стационарных временных рядов в теоретических и практических исследованиях применяют функцию спектральной плотности. Она переносит изучение процесса из временной области в частотную, и это часто является более плодотворным для описания процесса, нежели автокорреляционная функция, которую сложно интерпретировать из-за сильной зависимости соседних оценок.

Функция спектральной плотности (ФСП) $S(f)$ и функция автоковариации $\gamma(\tau)$, несущая в себе информацию о периодических зависимостях процесса, связаны взаимным преобразованием Фурье. Для стационарного дискретного процесса эта связь выражается формулой

$$\widehat{S}(f_i) = \frac{1}{2\pi} \left[\gamma(0) + 2 \sum_{\tau=1}^{N-1} \gamma(\tau) \cos(2\pi f_i \tau) \right],$$

где $\widehat{S}(f_i)$ — оценка ФСП; $\gamma(\tau)$ — автоковариация с лагом τ ; N — длина ряда; f_i — частота колебаний.

Оценки ФСП являются асимптотически несмещенными, но с ростом длины ряда их дисперсии не стремятся к нулю. Поиск методов, приводящих к снижению среднеквадратического уклонения оценок спектральной плотности, привел к идее включения весовых множителей $q(k)$ спектральной плотности, называемых спектральными «окнами». В настоя-

щее время существует достаточно много различных видов «окон», сглаживающих значения функции спектральной плотности и обеспечивающих состоятельность ее оценок. Наиболее часто используется «окно» Парзена

$$q(k) = \begin{cases} 1 - 6 \frac{k^2}{\tau^2} \left(1 - \frac{k}{\tau}\right), & 0 \leq k \leq \frac{\tau}{2}; \\ 2 - \left(1 - \frac{k}{\tau}\right)^3, & \frac{\tau}{2} \leq k \leq \tau. \end{cases}$$

Функция спектральной плотности, вычисляемая для диапазонов частот и сглаженная «окнами» Парзена, дает возможность обобщить разложение и тем самым получить более наглядную картину динамики процесса. Величина функции спектральной плотности представляет собой долю, вносимую данной составляющей в дисперсию ряда.

Существует много проблем, связанных с получением оценок спектров (обусловленных в основном тем, что мы не можем удовлетворительно оценить непрерывную кривую, содержащую бесконечное число точек, когда задано только конечное число данных), однако сейчас существуют различные приемлемые методы оценивания [Гренеджер, Хатанака, 1972].

Количество информации, которое может получить специалист из оценок спектра, на первый взгляд может показаться недостаточным, чтобы оправдать объем связанных с этим вычислений. В известном смысле это так, поскольку информацией о том, какие частотные полосы наиболее важны, часто невозможно воспользоваться, если не обнаружены признаки пиков. Однако спектральные методы оказываются очень полезным инструментом для объяснения свойств случайных процессов, анализа причин того или иного их поведения.

Вполне понятно, что спектральный анализ следует применять к временным рядам таких параметров процесса, которые подвержены сколько-нибудь существенным колебаниям.

Таким образом, использование методов спектрального анализа по каждой эмпирической кривой дает возможность оценить ее характеристики в частотной области (амплитуда, период, фаза) и на их основе методами многомерной классификации получить типологию процессов по характеру их протекания. Пример применения описанной методики подробно изложен в главе 5.

КРИТЕРИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ И ОТДЕЛЬНЫХ ПЕРЕДЕЛОВ

В настоящее время одним из основных направлений использования ЭСМ производственных процессов является нахождение оптимальных характеристик деятельности отдельных производственных групп оборудования, подразделений и предприятия в целом. В общем виде задача ставится так: на основе экономико-статистических моделей найти разрешающую систему, способную выработать оптимальную стратегию ведения процесса. При этом следует подчеркнуть, что оптимизация режима функционирования предприятия необходима как с позиций самого предприятия, так и для решения задач планирования на более высоких ступенях управления (отрасль, многоотраслевой комплекс). Дело в том, что прогнозирование технико-экономических показателей действующих предприятий для формирования отраслевых планов должно основываться на информации, соответствующей оптимальным режимам их функционирования. Таким образом, предприятие и его подразделения сами по себе являются объектами оптимизации и в то же время являются первичными объектами в моделях оптимизации отраслевых систем. При формировании способов развития объектов отраслевых систем центральным вопросом является оценка величины их технико-экономических показателей, соответствующих оптимальным режимам функционирования. Из всего круга формальных и содержательных задач, требующих при этом решения, выделим три, являющиеся, на наш взгляд, основными: учет множественности целей любых экономических (в нашем случае производственных) систем; учет необходимости согласования критериев отдельных производственных систем друг с другом и с системой высшего уровня; оценка правомерности оптимизации процессов на базе конкретных ЭВМ и возможности использования результатов оптимизации на разных стадиях планирования. Остановимся более подробно на каждом из сформулированных вопросов.

§ 1. Множественность целей производственных систем, выбор критериев и проблемы многокритериальности

Задачи выбора критериев функционирования возникают на всех уровнях производственных систем, и решение их, как правило, не лежит на поверхности. Рассмотрим сле-

дующий случай. Зачастую в нормировании ориентируются на максимально возможную производительность агрегата, но в конкретных условиях она не всегда является наиболее целесообразной экономически. Дело в том, что уже на уровне агрегата имеются противоречия между такими технико-экономическими показателями, как производительность агрегата, себестоимость продукции, характеристики ее качества, удельные расходы сырья, топлива и др. Оптимальные значения показателей эффективности производства (себестоимость, удельные расходы сырья и материалов, топлива и энергии), как правило, достигаются при менее форсированных режимах эксплуатации, нежели максимум производительности агрегата.

Естественно, что круг показателей, характеризующих деятельность предприятия, более широк, чем для агрегата или цеха, и внутри этой системы показателей неизбежно имеются определенные противоречия. Так, конечные результаты работы металлургических предприятий характеризуются следующими экономическими показателями:

- производство промышленной продукции (работ, услуг);
- прибыль (доход);
- валютная выручка;
- показатели совершенствования технологических процессов, качества продукции или другие важнейшие общие показатели научно-технического прогресса;
- рост производительности труда;
- объемы геолого-разведочных работ;
- показатели развития социальной сферы и др.

В условиях, когда глобальный критерий по народному хозяйству в целом не определен, выбор критерия оптимизации для отдельного предприятия, на наш взгляд, должен осуществляться в рамках задачи, в которой предприятия выступают как отдельные локально замкнутые объекты. При этом не рассматриваются вопросы привлечения дополнительных ресурсов, а речь идет только о нахождении внутренних резервов. Тогда улучшение работы того или иного предприятия не будет противоречить народнохозяйственным интересам.

Процесс многокритериальной оптимизации является многоэтапным. Сначала формируется первичный набор целей, включающий как можно более широкий круг их, чтобы случайно не пропустить важную цель. Но поскольку сложность решения задачи оптимизации во многом зависит от числа подлежащих учету целей, их желательно укрупнить и упростить. Эффективный прием для этого — установление пе-

рархии целей (построение графа связей) и измеряющих их показателей. При этом может оказаться, что некоторая цель является подцелью, средством достижения более общей цели. Например, в первоначальном перечне целей представляется как снижение себестоимости продукции, так и снижение удельных расходов сырья и топлива. Понятно, что последние есть лишь подцели, средства снижения себестоимости, и в общем случае самостоятельного значения не имеют. Однако при дефицитности какого-либо ресурса снижение его удельного расхода может быть самостоятельной целью, независимо от влияния на величину себестоимости продукции.

При уточнении целей необходимо определить не только возможности, но и степень их достижения в планируемом периоде. Для этого целесообразно сопоставить каждую цель с фактически достигнутыми значениями показателя и определить меру их несоответствия, учесть мнение экспертов.

Сложный вопрос — подбор измерителей степени достижения качественных целей. Здесь целесообразно попытаться подобрать количественный эквивалент (например, для характеристики качества продукции использовать показатели химического состава и механических свойств; сохранность оборудования охарактеризовать сроком его безремонтного функционирования и т. д.). В крайнем случае использовать балльные оценки степени достижения качественной цели либо оценки вероятности ее успешного достижения.

Выполнение указанного круга предварительных исследований дает основание надеяться, что выбранный набор целей и связанных с ними критериев будут отвечать некоторому набору необходимых требований. Р. Л. Кини и Х. Райфа [1981] выделяют пять свойств, которыми должен обладать набор критериев. Важно, чтобы используемый набор критериев был полным — охватывал все важные аспекты исследуемой проблемы; действенным — мог быть с пользой применен в анализе; разложимым — чтобы процесс оценки можно было упростить, разбив его на части; неизбыточным — не дублировал учет различных аспектов последствий принятия решений; минимальным — чтобы размерность решаемой задачи оставалась по возможности относительно небольшой.

Задача формирования набора критериев решается с использованием экономико-статистических методов. Дело в том, что в экономических системах многие важные показатели должны быть тесно связаны друг с другом. Так, в нормально развивающейся системе росту объема реализуемой продукции сопутствуют снижение себестоимости, рост при-

были и т. д. Если же статистический анализ показывает, что этого не происходит, следует выявлять показатели, характеризующие противоречия развития, и включать их в набор критериев, ставя конечной целью повышение уровня гармоничности развития производственной системы. Поскольку связи между этими показателями определяются влиянием множества организационно-технических и экономических причин, выявление несогласованных тенденций изменения показателей помогает в выявлении «узких мест» производственного процесса.

В зависимости от способа соизмерения целей выделим три варианта многоцелевой оптимизации режима функционирования промышленного объекта.

Вариант 1. Выбран один основной критерий оптимизации, периодичность учета которого совпадает с единицей статистического наблюдения. Другие важные для данных производственных условий технико-экономические показатели работы объекта выступают в качестве ограничений, по ним заданы интервалы варьирования или же только верхние или нижние границы. В этом случае строится одна модель, состоящая из уравнений регрессии, балансовых и двухсторонних ограничений на переменные. Уравнение регрессии, которое описывает влияние независимых переменных на основной критерий, выступает в качестве целевой функции. Остальные уравнения и неравенства, описывающие влияние независимых переменных на вспомогательные критерии и взаимосвязь переменных между собой — в качестве ограничений.

Вариант 2 отличается от первого тем, что оптимизация производится по обобщенному критерию, который конструируется на основе взвешивания системы частных. Процесс построения статистической модели включает следующие операции: 1) построение для каждого частного критерия уравнения регрессии, описывающего его зависимость от входных переменных и параметров управления процессом; 2) построение соизмеряющей функции, связывающей частные и обобщенный критерии; 3) конструирование общей целевой функции; 4) конструирование общей системы ограничений на независимые переменные.

Можно дать следующую геометрическую интерпретацию этому подходу. Каждый из системы m частных показателей эффективности работы объекта рассматривается как ось евклидова пространства. Определенный режим функционирования, характеризующийся m показателями эффективности, представляется точкой m -мерного пространства. Обобщен-

ный показатель эффективности определяется соотношением частных показателей k_i , $i = \overline{1, m}$ на основе априорных весовых коэффициентов a_i , $i = \overline{1, m}$:

$$F_0 = \sum_{i=1}^m a_i k_i.$$

Таким образом, обобщенный показатель представляется семейством параллельных гиперплоскостей. Множество значений F_0 , принадлежащих одной гиперплоскости, характеризует один и тот же уровень общей эффективности достижения поставленных целей. Отсюда характерная особенность использования обобщающего показателя — возможность получения одного и того же его значения при разной комбинации частных показателей. Весовые коэффициенты имеют смысл взаимозаменяемости уровней частных показателей — с точки зрения сохранения одного и того же уровня общей эффективности режима. Характер процедур, используемых для установления весовых коэффициентов, зависит от ряда обстоятельств: наличия или отсутствия показателя более высокого ранга, с позиций которого осуществляется взвешивание, типа взвешиваемых показателей (количественные и качественные), возможности стоимостной оценки степени достижения целей и др.

Задача соизмерения довольно просто решается в случае, когда имеется один основной показатель, который невозможно учесть и измерить непосредственно в ходе экономико-статистического исследования, и несколько вспомогательных, промежуточных показателей более низкого ранга, представляющих его в исходной информации. Тогда соизмерение может быть проведено на основе функциональных зависимостей, если таковые имеются, в противном случае — на основе регрессионных моделей. При отсутствии основного критериального показателя наиболее целесообразно стоимостное взвешивание, но оно не всегда возможно.

В тех случаях, когда построение количественных соизмерителей затруднительно (например, оценки условий труда, качества продукции с длительным сроком службы и т. д.), весовые коэффициенты приходится устанавливать на основе экспертных оценок. Такие приемы давно разработаны. Например, в работе У. Черчмена, Р. Акофа и Л. Арнофа [1968] описан отличающийся достаточной универсальностью метод экспертной оценки относительной значимости множества рассматриваемых целей.

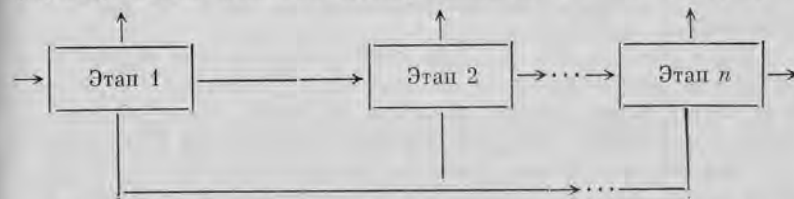
Вариант 3 характерен тем, что имеются несколько не сводимых друг к другу критериев одного ранга. В этом случае ставится задача нахождения оптимального компромиссного режима, обеспечивающего улучшение всех критериальных показателей. Решение задачи может быть получено по следующей схеме. Статистическими методами строятся целевые функции для каждого из выделенных критериев, конструируется общая система ограничений на независимые переменные; находятся оптимальные режимы для каждой целевой функции; ищется рациональное сочетание режимов, оптимальных для различных критериев.

Для нахождения такого сочетания можно воспользоваться методикой, предложенной Х. Юттлером [1967]. Она основана на использовании элементов теории статистических решений и линейного программирования.

§ 2. Построение согласованной системы критериев деятельности отдельных производственных объектов

На предприятиях с многоэтапным производственным процессом, какими являются предприятия с непрерывным или периодическим циклом, при планировании возникает необходимость увязки в единое целое различных технологически связанных заводских подсистем: цехов, переделов, участков, крупных агрегатов. Известно, что частные решения, улучшающие работу отдельных подсистем предприятия, могут противоречить друг другу в производственном потоке. Чтобы этого не произошло, необходимо определить глобальный критерий оптимизации по заводу, а частные критерии отдельных подразделений должны быть подчинены глобальному и согласованы между собой.

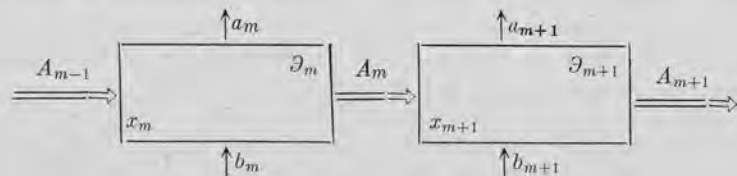
В общем случае многоэтапный процесс можно условно представить как цепь взаимосвязанных производств с информационным обменом между ними и с внешней средой:



При этом потоки информации какого-либо одного этапа являются составной частью информационной базы для других производственных этапов.

Рассмотрим фрагмент многоэтапной производственной системы, состоящий из двух смежных этапов m и $m+1$. Обозначим отвечающие этим этапам производственные подсистемы через \mathcal{E}_m и \mathcal{E}_{m+1} соответственно.

Информационные потоки, сопровождающие технологический процесс производства от \mathcal{E}_m к \mathcal{E}_{m+1} , могут быть представлены схематически.



Здесь для m -го этапа приняты следующие обозначения:

A_{m-1} — информационный поток (множество) параметров, исходящих из предыдущего в технологической последовательности $(m-1)$ -го этапа. Он является частью входного информационного потока для \mathcal{E}_m ;

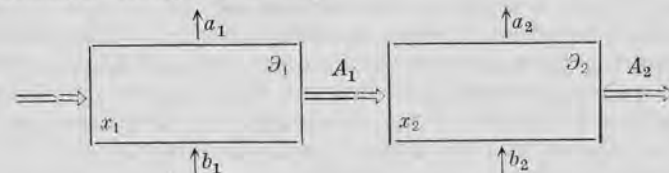
b_m — входной для \mathcal{E}_m поток информации, не связанный непосредственно с предыдущим этапом. Он включает, в частности, плановые задания по конечному для \mathcal{E}_m объему выпускаемой продукции, сведения о представляемых \mathcal{E}_m ресурсах и ограничениях на собственные мощности, информацию от координирующего весь производственный процесс органа и т. д.;

a_m — поток локальных, результирующих для \mathcal{E}_m (выходных) параметров, не оказывающих непосредственного влияния на последующий этап \mathcal{E}_{m+1} . Он может включать сведения об объемах конечного для \mathcal{E}_m продукта, фактически затрачиваемых объемах ресурсов, показателях эффективности деятельности \mathcal{E}_m и т. д.;

x_m — множество значений управляющих, внутренних для \mathcal{E}_m параметров, отражающих результат процесса принятия решения для \mathcal{E}_m .

Естественно, что в ходе производственного процесса в реальной производственной системе происходит обмен информацией между всеми этапами по схеме «каждый с каждым». Но, как правило, эти связи не распознаны. Мы примем, что для многоэтапных процессов можно, например, экспертным путем или на основании статистического анализа выделить информационные связи от этапа к этапу, наиболее существенные с позиций конечных результатов системы. Не нарушая общности, ограничимся в дальнейшем рас-

смотрением системы, состоящей из двух этапов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 и имеющей следующий вид:



Предположим, что каждый из этих этапов может быть представлен своей локальной экономико-математической моделью: соответственно m_1 и m_2 .

Обозначим далее через U_1 выходящий информационный поток для \mathcal{E}_1 . Он является объединением потоков a_1 и A_1 , т. е. $U_1 = \{A_1, a_1\}$. Аналогично $U_2 = \{A_2, a_2\}$ — выходящий поток для \mathcal{E}_2 .

Результаты моделирования в \mathcal{E}_2 базируются на информационном потоке, включающем A_1 , т. е. $m_2 = m_2(A_1)$. Это означает, что результаты моделирования в \mathcal{E}_2 предъявляют определенные требования к выходящему из \mathcal{E}_1 потоку A_1 . Рассмотрим эти требования подробнее.

Пусть установлены некоторые, в общем случае векторные критерии эффективности функционирования как для первого, так и для второго этапов. Обозначим их соответственно через F_1 и F_2 .

F_2 является функцией (вектор-функцией) от A_1 и b_2 , т. е. $F_2 = F_2(A_1, b_2)$. Будем считать, что данный критерий F_2 таков, что он позволяет однозначно соизмерять различные реализации множества параметров A_1 при фиксированном b_2 , т. е. $F_2 = F_2(A_1)$.

Рассматривая эффективность всей системы \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 с позиций только второго этапа, можно сказать, что требования к A_1 на языке модели m_2 состоят в ослаблении ее ограничений за счет воздействия на A_1 . Последнее запишем как $m_2 = m_2(A_1)$. Для экономических систем целесообразно принять гипотезу о том, что монотонное изменение параметров A_1 в модели m_1 ведет к монотонному изменению $F_2(A_1)$ в модели m_2 . Это означает, что для изменения значений \mathcal{E}_2 существуют «благоприятные» направления изменения A_1 .

Гипотеза о монотонной зависимости означает, что те параметры A_1 , которые функционально никак не связаны с другими параметрами, примут свои крайние, наиболее «благоприятные» для \mathcal{E}_2 значения. Остальные параметры A_1 также примут «благоприятные» (но не обязательно крайние) для \mathcal{E}_2 значения. Формально строгим здесь является подход,

при котором аналитические выражения для A_1 включаются в модель m_2 и уже в этой расширенной модели проводятся расчеты поиска оптимальных значений A_1 .

Таким образом, исходя исключительно из интересов \mathcal{E}_2 критерии оптимизации в \mathcal{E}_1 должны служить цели достижения оптимальных для \mathcal{E}_2 значений параметров A_1 . Оптимизация других параметров, не входящих в информационную базу, приведет только к ухудшению критерия F_2 .

Хотя оценка по конечному результату деятельности технологически связанных производств является, по-видимому, наиболее правильной, однако этот подход имеет ряд объективных ограничений. Это обусловлено в первую очередь тем, что на промежуточных этапах может быть выпущена определенная часть конечной продукции и услуг, производимых всей системой. Последнее предполагает использование аппарата оценки экономической эффективности этих этапов, так как они обладают определенной экономической самостоятельностью. Далее, между результатами труда на предыдущих этапах, особенно на этапах начальной стадии производственного процесса, и на конечном этапе существуют временной и технологической лаги. Первый из них снижает оперативность стимулирования на промежуточных этапах, что, как известно, имеет ряд отрицательных последствий. Лаг второго типа приводит к тому, что на последующих этапах возможны технологические сбои, производственный брак, за которые предыдущие этапы не несут ответственности. Все это выдвигает необходимость локальных критериев оценки деятельности всех этапов.

Необходимо выделить одно важное условие: критерии деятельности предприятия и отдельных подразделений могут быть различными. На наш взгляд, здесь полностью применимо положение, выдвинутое и развиваемое Д. М. Казакевичем [1980] о том, что критерии эффективности для разных уровней планирования могут быть различными, и это несколько не противоречит принципу единства народнохозяйственных планов. Планирование народного хозяйства — многоуровневый и многозвенный итеративный процесс, в котором могут применяться модели с различными критериями, если при их построении будут использоваться экономические оценки, полученные на основе оптимизационных расчетов более высоких уровней.

Рассмотрим ситуацию, когда предприятие имеет собственную сырьевую базу и все технологические переделы являются в достаточной степени управляемыми. Тогда общую задачу выбора локальных критериев предлагается решать

как несколько последовательно реализуемых серий задач оптимизации статистических моделей, причем число таких серий равно числу переделов.

Решение задачи начинается с выбора оптимального режима для конечного передела, определяющего выходные показатели предприятия, т. е. процесс решения заключается в последовательном движении от конца технологической цепочки к ее началу. Внутри каждого передела осуществляется выбор критерия его оптимизации путем расчета значения общего критерия для каждого из вариантов оптимизации. Под вариантом оптимизации понимается определение оптимального значения одного из выходных показателей при ограничениях по остальным. При нахождении оптимума локального критерия значения входных параметров данного передела в оптимальном варианте можно рассматривать как требования, предъявляемые к предыдущему технологическому переделу.

Затем решается задача для предыдущего передела. Критерием оптимизации здесь становится тот показатель, при оптимизации которого получается наилучшее значение общего критерия уже с учетом деятельности данного передела. Расчет производится путем подстановки значений, полученных в оптимальном варианте для предыдущего передела, в уравнения регрессии последующего передела. Таким образом, на этом этапе уточняются фактически достижимые величины факторов последующего передела и предъявляются требования к выходным параметрам предыдущего передела и т. д. до полного решения задачи.

Вышеизложенное можно записать следующим образом. Пусть определен общий критерий деятельности предприятия. Требуется найти критерии работы переделов, входящих в технологическую цепочку.

Введем обозначения:

x_{i_i} — входные параметры i -го передела;

y_{ij} — выходные параметры i -го передела;

k — число технологических переделов;

i — индекс передела ($i = 1, 2, \dots, k$);

p — индекс входного параметра ($p = 1, 2, \dots, m$);

j — индекс выходного параметра ($j = 1, 2, \dots, n$);

y — средние значения выходных параметров;

r — индекс выходных параметров, являющихся одновременно входными для последующего передела ($r = 1, 2, \dots, m$).

Любой y_{ij} может быть критерием оптимизации i -го передела. Тогда для k -го передела можно записать:

$$z = y_{kj} = f(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km}),$$

где z — целевая функция.

Эту функцию можно записать в виде

$$z = b_0 + b_1 x_{k1} + b_2 x_{k2} + \dots + b_m x_{km}.$$

Требуется найти $y_{kj} \rightarrow \min (\max)$ при ограничениях:

$$\bar{y}_{kj} - 2\sigma \leq \bar{y}_{kj} \leq \bar{y}_{kj} + 2\sigma;$$

$$x_{kp}^{\min} \leq x_{kp} \leq x_{kp}^{\max}, \quad y_{kr} \geq 0; \quad x_{kp} \geq 0.$$

Введем

$$y_{h-1,j} \in M\{x_{hp}\}, \quad x_{hr} \in M\{y_{h-1,j}\},$$

$y_{h-1,j}$ — определены из решения задачи для k -го передела, критерий эффективности которого является конечным для всей технологической цепочки.

Тогда

$$y_{h-1,j} = f_{h-1,j}(x_{h-1,1}, x_{h-1,2}, \dots, x_{h-1,m}) = b_0 + b_1 x_{h-1,1} + b_2 x_{h-1,2} + \dots + b_m x_{h-1,m}.$$

Задача сводится к определению $y_{h-1,j} = \text{extremum}$ в зависимости от конкретных условий оптимизации:

$$y_{h-1,r} \geq 0;$$

$$y_{h-1,j} \geq 0.$$

Критерием оптимизации для передела становится такой показатель $y_{h-1,j}$, экстремальное значение которого позволяет оптимизировать конечный критерий. Это же самое требование предъявляется и к критерию оптимизации переделов ($k-2$), ($k-3$) и т. д. Такой подход дает возможность корректировать параметры технологических процессов в целях достижения оптимальных технико-экономических результатов и количественно определять параметры для предприятий как на перспективу, так и для нужд оперативного управления.

§ 3. Правомерность оптимизации производственных процессов на основе статистических моделей

При построении оптимизационных статистических моделей и содержательной интерпретации их результатов возникает ряд вопросов, решение которых формализовать очень трудно или даже невозможно. Один из вопросов: как выбирать интервал изменения переменных x оптимизационной статистической модели? Наиболее простой прием — по каждому входному фактору оценивать среднее значение и ограничения поставить в пределах $\pm k\sigma$ от этого среднего (σ — среднее квадратическое отклонение). Этот прием, при котором исходят из нормального распределения случайных величин, реализуется довольно часто. Однако он далеко не всегда применим, так как при этом исходят из независимости факторов, которая фактически никогда не имеет места: нахождение любого из факторов в интервале $\pm k\sigma$ еще не гарантирует допустимости сочетания нескольких факторов. Поэтому при определении допустимых интервалов изменений входных факторов формальные процедуры могут играть только вспомогательную роль, и необходим глубокий содержательный анализ. В противном случае велика вероятность получения нереализуемого плана, так как в результате решения оптимизационной задачи большинство входных факторов принимает значение на границах интервалов — решение находится в крайних точках области ограничений.

В результате того, что оптимальные значения далеки от средних, даже при условии реализуемости плана, может получиться так, что оптимум выйдет за допустимый статистический интервал варьирования для данной совокупности. А это означает несоответствие полученного оптимального плана структуре модели, т. е. такие значения случайной величины с малой вероятностью могут встретиться в выборке, по которой построена ЭСМ. Отсюда формальная оптимизация статистической модели нуждается в процедуре проверки на принадлежность оптимального плана к исходной выборке.

Основная сложность применения оптимизируемой ЭСМ заключается в определении возможности и допустимости оптимального решения, полученного на ее основе. Дело в том, что статистическая модель построена для определенной выборки, для определенных интервалов варьирования факторов и определенных их комбинаций. Полученное по модели оптимальное решение может не принадлежать к этой вы-

борке и неизвестно, действительны ли в этой новой области закономерности, относящиеся к выборочной совокупности.

Рассмотрим более подробно общую постановку задачи оптимизации статистической модели.

Пусть $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ — входные переменные,
 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ — выходные переменные.

На возможные значения переменных наложены ограничения (например, технологический регламент):

$$x_{j\min} \leq x_j \leq x_{j\max}, \quad j = \overline{1, m}; \quad (3.1)$$

$$y_{p\min} \leq y_p \leq y_{p\max}, \quad p = \overline{1, n}. \quad (3.2)$$

Математически рассмотренный объект можно представить системой линейных регрессионных уравнений:

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^m \beta_{ji} x_j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.3)$$

где β_{ji} — выборочная оценка соответствующего коэффициента регрессионной модели.

Пусть имеется некоторая линейная зависимость

$$L = \sum_{j=1}^m a_j x_j. \quad (3.4)$$

Задача оптимизации объектов сводится к нахождению такой точки внутри (3.1), которая удовлетворяет системе (3.3) и (3.2) и одновременно приводит к экстремуму (3.4).

Специфика оптимизации статистической модели заключается в необходимости решения задачи стохастического программирования, т. е. выбора такого допустимого x , приводящего к экстремуму показатель качества, чтобы при этом случайная величина y попала в допустимое множество с заданной вероятностью:

$$P\{y_{\min} \leq y \leq y_{\max}\} \geq p_0.$$

Для решения подобной задачи можно использовать методы многомерной классификации [Розин, Ягольницер, 1981]. Преимущество этого подхода к анализу возможности оптимизации статистической модели заключается в его универсальности. Многомерная классификация, не требуя дополнительных жестких ограничений, дает возможность определить принадлежность оптимального состояния к исходной выборочной совокупности. Сущность предлагаемого подхода заключается в следующем.

При оптимизации статистической модели мы находим такое допустимое значение входных характеристик x^* , которое не приводит к нарушениям ограничений системы и доставляет экстремум некоторому критерию качества. Однако формальная оптимизация может привести к такому решению x^* , которое не принадлежит исходной совокупности. Это может возникнуть из-за того, что при такой оптимизации не учитывается стохастичность вектора x^* , свойства которого обусловлены статистическими свойствами матрицы коэффициентов β_{ji} .

Для проверки возможности оптимизации статистической модели необходимо определить, относится ли полученное оптимальное решение x^* к одному из классов рассматриваемой совокупности. В этих случаях нелогично исходить из того, что найденное оптимальное решение непременно принадлежит к одной из известных нам групп. В статистическом анализе мы должны учитывать, что исследуемый объект может принадлежать к неизвестной группе. Если такой факт установлен, то прямая оптимизация статистической модели недопустима. Необходимо принять меры для повышения адекватности модели в граничных точках (создания перехода к оптимальному состоянию). Для этого можно первоначально полученное оптимальное состояние (не принадлежащее выборке фактических состояний объекта) добавить в исходную выборку и пересчитать все параметры статистической модели. Затем на этапе оптимизации оптимальный план вновь проверяется на принадлежность к исходной выборке. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено состояние, адекватное структуре, дополненной оптимальными состояниями выборки.

Предлагаемый процесс оптимизации модели представлен на схеме 3.1.

Какие же соображения можно высказать по поводу предлагаемой процедуры оптимизации? Они достаточно ясны. Ставя и решая задачу оптимизации функционирования объекта, мы получаем его состояние, отличное от фактического. На такое состояние моделируемый объект «вытаскивается» решением задачи линейного программирования. Но также правомерно, по-видимому, предположить, что параметры оптимального плана могут в определенной степени не соответствовать сложившейся сегодня специфике производственной деятельности объекта, в соответствии с которой находятся исходные параметры оптимизационной модели. Если оптимальная реализация не принадлежит выборке фактических состояний, то и структура модели, построенной



Схема 3.1. Схема проверки допустимости оптимального решения

по этой выборке, не адекватна оптимальной реализации. Добавление в исходную выборку оптимальной реализации приближает фактическое состояние к оптимальному, т. е. создается «коридор» для перехода от фактического к оптимальному состоянию объекта.

Посмотрим, что же может произойти, если полученный оптимальный план не принадлежит к исходной выборке. Как известно, используемый для расчета уравнений регрессии метод наименьших квадратов дает структуру модели, ориентированную на среднее значение признаков совокупности. Поэтому отклонения рассчитанных по линейному уравнению значений от фактических меньше для наблюдений, близких к средней, чем для наблюдений, от средней удаленных. Отсюда следует, что для значения, не принадлежащего к исходной выборке, ошибка оценки может быть достаточно велика, и найденное путем решения оптимизационной задачи значение может находиться достаточно далеко от «истинного» оптимума. При многократных реализациях такого псевдооптимального режима результативные параметры процесса будут принимать значения, сильно уступающие по своей величине рациональным.

Отметим еще два обстоятельства, которые могут приводить к ошибкам при построении и решении оптимизационных статистических моделей.

Во-первых, форма связи между входными факторами и выходными показателями в данном случае принимается линейной. Правомерность такого подхода во многом объясняет-

ся малой вариацией переменных в хорошо налаженном производственном процессе. Совершенно не обязательно, чтобы условие линейности соблюдалось для выборки, охватывающей большие интервалы изменения факторов, т. е. выборки, к которой фактически принадлежит оптимальный план.

Во-вторых, специфика построения оптимизационной статистической модели такова, что в целевую функцию необходимо включить все факторы, входящие хотя бы в одно из уравнений для остальных выходных показателей. Если же несколько показателей последовательно выполняют роль целевой функции, то практически для всех выходных показателей приходится формировать единый набор входящих в уравнение множественной регрессии факторов. При построении уравнений множественной регрессии для модели каждого выходного показателя из множества входных факторов отбирается некоторое подмножество существенных факторов. Как показывает практика, для различных показателей эти подмножества не тождественны, т. е. на характеристики функционирования предприятия и его подразделений, отражающие различные стороны производственной хозяйственной деятельности, влияют отличные друг от друга группы входных факторов. Поэтому для построения оптимизационной статистической модели приходится включать в уравнение множественной регрессии незначимо влияющие факторы, т. е. неправильно специфицировать регрессионные модели. Возникающую впоследствии ошибку можно уменьшить, но практически невозможно устранить полностью.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что с решением оптимизационной задачи процедура поиска наилучшего режима ведения процесса еще далеко не заканчивается. Следующим этапом должно явиться сравнение результатов, полученных из модели, с фактическими, т. е. проверка опытом, и статистическая оценка величин отклонений расчетных значений от фактических при многократных реализациях плана. Это сравнение можно сделать, оценив возможную дисперсию оптимизируемого параметра. Учет и оценка этой дисперсии, являющейся, по сути дела, отражением вероятностного характера моделируемого процесса, является самостоятельной проблемой.

В литературе встречается утверждение, что вероятностные свойства сложных экономических систем учитываются при построении регрессионных уравнений и, следовательно, отражены в оптимизационных статистических моделях. На самом деле это не совсем так, и во время всей процедуры нахождения оптимального плана используется детерминиро-

ванная информация. Для доказательства этого положения сделаем небольшой экскурс в теорию вероятностей — обратимся к теореме Чебышева.

Теорема Чебышева. Если x_1, x_2, \dots, x_n попарно независимые случайные величины, причем дисперсии их равномерно ограничены (не превышают постоянного числа c), то как бы мало ни было положительное число ε , вероятность неравенства

$$\left| \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} - \frac{M(x_1) + M(x_2) + \dots + M(x_n)}{n} \right| < \varepsilon$$

будет как угодно близка к единице, если число случайных величин достаточно велико.

Таким образом, теорема Чебышева утверждает, что если рассматривается достаточно большое число независимых случайных величин, имеющих ограниченные дисперсии, то почти достоверным можно считать событие, состоящее в том, что отклонение среднего арифметического случайных величин от среднего арифметического их математических ожиданий будет по абсолютной величине сколь угодно малым. При этом определенные независимые случайные величины могут принимать значения, далекие от своих математических ожиданий. Нельзя уверенно предсказать, какое возможное значение примет каждая из случайных величин, но можно предвидеть, какое значение примет их среднее арифметическое.

Из теоремы Чебышева следует, что среднее арифметическое достаточно большого числа независимых случайных величин (дисперсии которых равномерно ограничены) утрачивает характер случайной величины. Объясняется это тем, что отклонения каждой из величин от своих математических ожиданий могут быть как положительными, так и отрицательными, а в среднем арифметическом они взаимно погашаются.

Среднее арифметическое, как и другие виды средней (мода, медиана), служит точечной оценкой ряда распределения случайных величин, отвечая при этом критерию минимума суммы квадратов отклонений. Для сравнения отметим, что медиана отвечает критерию минимума суммы отклонений, взятых по модулю, а мода — критерию минимума ошибок.

Линия регрессии, построенная с помощью метода наименьших квадратов, замещает среднее арифметическое в оценке ряда распределения случайных величин, отвечая тем же, что и среднее арифметическое, критериям хорошей оценки: несмещенности, эффективности, состоятельности.

Количественно эффективность такого замещения выражается отношением объясненной уравнением регрессии дисперсии данного показателя к полной дисперсии. Это отношение является коэффициентом детерминации. Так же, как и среднее арифметическое, линия регрессии является точечной оценкой многомерного ряда распределения и точно так же утрачивает характер случайной величины. Вероятностный характер исследуемого процесса здесь еще не учитывается. Для его учета необходимо количественное определение остаточной дисперсии, нахождение интервальных оценок и расчет доверительных интервалов.

Оптимизация производственного процесса на базе статистической модели сводится, в частности, к уменьшению дисперсии оптимизируемого параметра путем закрепления входных факторов модели на заданном уровне. Для оценки дисперсии данного параметра при реализации оптимального плана необходимо знать его дисперсию в исходной выборке σ^2 и величину множественного коэффициента корреляции R , характеризующего тесноту связи выходного параметра с факторами, вошедшими в уравнение регрессии в качестве независимых. Остаточная дисперсия, т. е. средний квадрат отклонений, рассчитанных по уравнению регрессии, от фактических значений, определяется по формуле $\sigma_{\text{ост}}^2 = \sigma^2(1 - R^2)$. Таким образом, величина остаточной дисперсии полностью определяется величинами первоначальной дисперсии и коэффициента корреляции. Эту остаточную дисперсию следует рассматривать как минимум дисперсии ряда распределения реализаций оптимального плана. Истинная дисперсия может быть больше остаточной, так как по причинам, указанным выше, возможны ошибки при нахождении точки оптимума, т. е. неправильное определение нового среднего значения выходного параметра. Такое смещение средней приведет к увеличению дисперсии.

Рассмотрим на условном примере, как оценивать вариацию значений оптимизируемого параметра вокруг точки оптимума. Предположим, что производственный объект выпускает в среднем за единицу времени 100 ед. определенного изделия. Дисперсия при этом составляет 25 ед., и, следовательно, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 5$ ед. Исследование взаимосвязей между производительностью данного объекта и входными факторами позволило построить уравнение множественной регрессии с коэффициентом корреляции $R = 0,8$. Решение оптимизационной статистической модели при ограничениях на уровень затрат, качество и т. д. показало, что при перестройке производственного процесса

(соответственно значениям x_i в оптимальном плане) средняя производительность в единицу времени может быть повышена до 110 ед. При этом среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\text{ост}} = \sqrt{\sigma^2(1 - R^2)} = \sqrt{25 \cdot 0,36} = 3$. При многократных реализациях плана в интервале $\pm 1\sigma$ должно находиться 67,7 % наблюдений, в интервале $\pm 2\sigma$ — 95,4 % и в интервале $\pm 3\sigma$ — 99,3 %. Т. е. с вероятностью $P = 0,954$ можно утверждать, что в данную единицу времени производительность объекта будет находиться в интервале $110 \pm 2\sigma_{\text{ост}}$ (104—116) ед. Примерно одна двадцатая часть всех реализаций будет выше или ниже и этих пределов. Среднее арифметическое значений ряда реализаций будет стремиться к 110.

Необходимо отметить, что с помощью методов линейного программирования можно получить только разовое оптимальное решение. Однако результаты, полученные на основе разовой оптимизации, весьма условны и полезны скорее с позиций общей тенденции, нежели с позиций получения конкретных числовых значений. Это происходит потому, что с течением времени изучаемая система изменяется, и ранее полученное описание процесса становится неадекватным. Поэтому в моделях необходимо изменять соотношения между переменными и сами переменные по мере их изменения в системе. Следует периодически проверять выполнимость различных допущений модели, на основании которой принимаются решения. То есть математическую модель процесса нужно непрерывно корректировать в связи с изменяющимися условиями.

Глава 4

ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭСМ В НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

§ 1. Анализ деятельности предприятия

Наша страна располагает мощным промышленным потенциалом, однако используется он недостаточно эффективно. Известно, что на производство единицы продукции у нас тратится больше сырья и энергии, а производительность машин и оборудования ниже, чем в других индустриально развитых странах. И причины этого заключаются не только в отставании технического уровня. Практика показывает, что на действующих предприятиях имеются значительные внутренние резервы, а использование их во многих случаях не требует сколько-нибудь существенных капитальных вложе-

ний. Повышение уровня производства за счет выявления и вовлечения внутренних резервов интенсификации работы действующих предприятий, по-видимому, можно рассматривать как самостоятельное направление, наряду с традиционными путями развития — новым строительством и реконструкцией.

Взятый страной курс на экономию, на более полное и рациональное использование тех ресурсов, которыми она располагает, требует приведения в действие всех резервов, повышения эффективности производства, решения комплекса задач экономического, технического, организационного характера.

По существу речь идет о повышении эффективности действующих производств без привлечения значительных ресурсов извне. Изыскание и использование внутренних резервов — это одна из основных задач анализа деятельности предприятия. Ее решение имеет наиболее важное значение для непрерывных производств, где функционируют технологические агрегаты больших размеров с длительным сроком службы, что ограничивает возможности их коренной реконструкции или замены оборудования.

В данном случае под резервами понимаются неиспользованные возможности роста и совершенствования производства. Обычно резервы производства различаются по времени их реализации и необходимым затратам на их вовлечение в работу промышленного объекта. Выделяются оперативные, текущие и перспективные резервы.

Перспективные резервы связаны с коренными изменениями в технике, технологии и организации производства. Поэтому их использование требует длительного подготовительного периода и, как правило, капитальных вложений на реконструкцию производства.

В непрерывном производстве представляют особый интерес те резервы, использование которых не требует привлечения значительных финансовых средств и материальных ресурсов извне, т. е. резервы, не связанные с радикальными изменениями. К таковым относятся оперативные и текущие резервы. Оперативные резервы определяют конкретные возможности улучшения работы предприятия в результате совершенствования технологии и организации производства, не требующих капитальных вложений. Такого вида резервы могут быть использованы в течение нескольких месяцев.

Текущие резервы связаны с возможностью улучшения работы предприятия путем внедрения организационно-технических мероприятий, для реализации которых требуются

относительно небольшие затраты. Вовлечение таких резервов требует более продолжительного периода времени, чем для оперативных.

Величину имеющихся на предприятии резервов производства можно приближенно оценить путем сопоставления фактических показателей его работы с показателями передовых предприятий отрасли. На образование и реализацию резервов производства влияет множество технико-технологических, природных, социальных и организационных факторов. В условиях интенсификации производства, когда лежащие на поверхности резервы уже использованы, на первый план выдвигается задача выявления и использования скрытых резервов.

Касаясь направлений повышения эффективности, отметим, что в ряде отраслей с дискретным характером производства основные резервы роста производительности труда и снижения себестоимости — механизация и автоматизация производства, расширение зон обслуживания оборудования. Главным образом, эти резервы связаны с сокращением численности занятых в производстве. Но для основных цехов производств с непрерывным циклом подобные возможности очень ограничены. Фонд заработной платы и основные производственные фонды в этих цехах, как правило, изменяются незначительно. Количество основных агрегатов, а следовательно и рабочих мест, строго регламентировано технологической схемой производства. Повышение эффективности производства здесь чаще всего определяется ростом производительности основного оборудования при той же численности обслуживающего персонала. Иными словами, необходимо улучшить использование имеющихся производственных мощностей, повысить рост фондоотдачи. Кроме того, поскольку производства этого типа, как правило, очень материалоемки, то здесь остро стоит проблема экономного расходования материалов, топлива и энергии, сокращения их потерь в процессе производства.

В законе «О предприятиях в СССР»^{*} говорится, что предприятие независимо от форм собственности на средства производства и другое имущество действует на принципах хозяйственного расчета. Вмешательство в хозяйственную и иную деятельность предприятия со стороны государственных, общественных и кооперативных органов не допускается, если она не затрагивает прав государственных органов по осуществлению контроля за деятельностью предприятий.

^{*} Экономика и жизнь. 1990, № 25.

Убытки, причиненные предприятию в результате выполнения указаний государственных или иных органов либо их должностных лиц, нарушивших права предприятия, подлежат возмещению этими органами. В связи с этим резко повышается заинтересованность предприятий в учете при планировании их истинных возможностей, в научной обоснованности планов и нормативов. Появляется не навязываемая сверху, а объективно обусловленная необходимость использования экономико-математических методов и моделей в процессе анализа, планирования и управления.

§ 2. Планирование производства

Задачи планирования — это, по существу, задачи принятия решений. В условиях множественности возможных вариантов реализации технологического процесса в непрерывных производствах эти задачи, как правило, носят оптимизационный характер. Поэтому для разработки научно обоснованных планов недостаточно одних статистических моделей. Необходим комплекс экономико-математических моделей: статистических, балансовых, оптимизационных и др. Это обусловлено тем, что ЭСМ в отличие от различных типов нормативных моделей имеют скорее исследовательский, прогнозный характер и могут быть названы моделями описания экономических процессов. В ЭСМ главным предметом изучения являются не способы достижения определенного состояния, а сам процесс развития объектов в пространстве и во времени. Они пригодны для выявления тенденций, имеющих место в прошлом и ожидаемых в будущем.

В отличие от них модели математического программирования являются в основном нормативными средствами, они, главным образом, приспособлены для оценки потенциальных возможностей производства, т. е. отвечают на вопрос, каким могло бы быть развитие, если бы были претворены в жизнь условия, заложенные в такую модель, и играют меньшую роль в прогнозировании того, что будет осуществлено. Оптимальные (нормативные) модели нацелены в основном на достижение каких-то определенных состояний изучаемой экономической системы, и главное внимание уделяется именно изучению этих особых состояний системы. Основная их цель заключается не в отражении действительности, а в определении рационального (наилучшего, оптимального) способа поведения.

Практически невозможно при помощи одного типа модели (нормативной или статистической) получить обоснованное решение достаточно сложной задачи планирования. Два указанных вида моделей экономических систем и соответствующие виды прогнозов дополняют друг друга. Их комплексное применение позволяет преодолеть узость каждого отдельного подхода: с одной стороны, в нормативные модели ввести процесс движения к оптимальному состоянию, учесть возможность его достижения существующими механизмами производственно-хозяйственной деятельности; с другой — включить элемент цели, нормативности в статистические модели функционирования, т. е. наметить цели процесса развития, направить его в желаемую сторону.

Следует отметить, что если ЭСМ объекта выступает лишь в качестве информационной базы для принятия решений на более высоких уровнях планирования по другим моделям, прогнозирование технико-экономических показателей по ЭСМ должно основываться на информации, соответствующей оптимальным режимам функционирования объектов.

Таким образом, при решении задач планирования либо используется модифицированная форма экономико-статистической модели («оптимизируемая» ЭСМ), либо взаимосвязанная система моделей различных типов. В дальнейшем изложении под модельной технологией планирования понимается использование комбинированных, гибридных систем ЭММ для решения задач принятия решений.

Можно отметить следующие основные преимущества перехода к модельной технологии планирования.

1. Формализация экономических задач и применение электронной техники повышают точность расчетов и сокращают сроки и трудоемкость их выполнения. Тем самым создается возможность реализации принципа многовариантности планирования. Это существенно повышает научную обоснованность плановых решений.

2. Использование методов экономико-математического моделирования позволяет расширить и углубить область конкретного количественного анализа в планировании; создается возможность изучения и описания взаимодействия многих факторов, оказывающих влияние на развитие производственных объектов, выделения существенных факторов и т. д.

3. Методы экономико-математического моделирования дают возможность решать многие нереализуемые традиционной технологией планово-экономические задачи. Тем самым обеспечивается повышение качества и адекватности планиро-

вания, переход к новому, более высокому уровню научного обоснования плановых решений.

4. Разработка и применение экономико-математических моделей оказывает большое влияние на совершенствование экономической информации. В процессе перехода к модельной технологии планирования формулируется система четких требований к экономической информации, происходит ее упорядочение, разрабатываются строгие алгоритмы ее формирования, преобразования и корректировки.

Включение математических моделей в технологию планирования — длительный многоэтапный процесс; его реализация предусматривает адаптацию ЭММ к сложившейся технологии планирования и совершенствование последней под влиянием модельных процедур.

Начальный шаг в процессе сближения моделей и плановых функций предполагает их «понятийное приближение». Оно должно выражаться в формулировании набора требований и условий со стороны плановых функций к моделям и в изучении возможностей («потребительских свойств») различных типов моделей. Это, в свою очередь, предполагает классификацию всех плановых функций по характеру их требований, а также описание и классификацию различных типов моделей по возможностям выполнения тех или иных требований.

На наш взгляд, построение таких классификаций и их сравнительный анализ позволит выявить расхождения между требованиями технологии плановых расчетов и свойствами созданного модельного аппарата, определить направления адаптации, место отдельных моделей, условия и очередность их включения в технологию планирования.

Для того чтобы быть включенными в технологию планирования, модели должны удовлетворять ряду общих требований, вытекающих из технологии планирования и специфики отдельных классов плановых задач.

1. Функциональное соответствие моделей задачам технологии планирования и возможность их адресной привязки к плановым задачам, исполнителям и пользователям.

2. Типизация и адаптивность математических моделей, включаемых в технологию планирования. Анализ плановых задач свидетельствует о том, что они поддаются классификации. Следовательно, адресно привязанные к ним модели тоже должны быть стандартизованы по конструкции, по входам и выходам и т. д.

3. Наряду с требованием типичности, стандартности практика технологии планирования предъявляет к моделям

требования гибкости и адаптивности. Экономические процессы отличаются значительной подвижностью, изменчивостью (особенно в условиях НТР), поэтому и описывающие их модели должны быть гибкими. Кроме того, модели должны постоянно находиться под воздействием (реагировать на последствия) принимаемых плановых решений.

4. Информационное соответствие входов и выходов модели информации, циркулирующей в системе плановых расчетов.

5. Возможность использования моделей в реальном режиме разработки плана. Это требование относится как к срокам выполнения расчетов по модели, к способам расчетов (предпочтительность диалогового режима), так и к формам ввода и вывода информации.

Ранее перечисленные общие требования к математическим моделям дифференцируются по жесткости для различных режимов и стадий планирования.

Основными признаками классификации плановых задач могут выступать: содержание, режим и стадия планирования, реализуемость, формализуемость и т. д.

В общем случае плановые задачи по содержанию могут быть подразделены на пять агрегированных типов со следующими ориентировочными названиями:

I — формирование целей и задач экономической политики;

II — аналитико-оценочные и прогнозные функции;

III — итеративные сводно-балансовые функции с элементами согласования;

IV — оптимизационно-балансовые функции;

V — принятие решения по окончательному варианту плана.

Коротко охарактеризуем каждый из выделенных типов.

Содержанием плановых задач первого типа является определение целей функционирования и экономического развития объекта, их уточнение и детализация в различных аспектах; разработка системы критериев, характеризующих степень достижения целей, и т. д. Плановые функции задач данного типа в значительной степени неформализуемы; однако в последние годы разработаны методы, позволяющие вносить элементы алгоритмизации в процедуры их выполнения (ситуационный анализ, опросы экспертов и т. д.).

Плановые функции задач второго типа служат для прогнозирования возможных путей деятельности объекта и его развития. Отличительная черта функций, включаемых в этот класс, состоит в том, что большое внимание уделяется

анализу прошлых тенденций, оценке положения на начальный момент планирования и укрупненным прогнозам, выявлению «узких мест», диспропорций. Такие аналитические оценочные процедуры присутствуют на всех стадиях и во всех режимах планирования, но их роль возрастает по мере увеличения горизонта планирования и убывает по мере приближения к конечным стадиям разработки планового документа в определенном режиме.

По направленности плановые функции задач второго типа могут быть разделены на три подкласса:

оценка и прогноз альтернатив развития с учетом научно-технического прогресса и сдвигов в структуре производства;

оценка и прогноз возможностей удовлетворения различных вариантов развития за счет привлечения основных фондов, трудовых и материальных ресурсов;

оценка и прогноз нормативов, формирование показателей затрат и их уточнение.

Для процедур этого типа могут быть широко использованы методы прямых расчетов нормативного характера, экспертно-статистические подходы, метод производственных функций, укрупненные статистические модели автономного характера.

Назначение плановых функций, входящих в задачи третьего типа — выработка первичных сбалансированных заданий и вариантов с дифференциацией по переделам, цехам, участкам. Процесс сводки носит двойственный, итеративный характер: с одной стороны, по временным циклам внутри одного уровня, с другой — по уровням планирования. Эти функции включают, как правило, первичную сводку (для постепенно возрастающего уровня агрегирования), выявление невязок (дисбалансов), уточнение нормативов, новую сводку и т. д. до получения допустимой точности решения. Допустимая погрешность балансовых процедур возрастает по мере увеличения горизонта планирования и убывает при приближении к конечным стадиям разработки планового документа в определенном режиме.

На начальных итерациях балансовых процедур большую роль будут играть методы прямого счета, статистические оценки нормативов различного рода в зависимости от технического уровня производства, природно-географических и организационных факторов. Для последующих итераций и более высоких уровней планирования основная роль принадлежит матрично-балансовым моделям и обеспечивающим их моделям агрегированных норм и нормативов.

Содержанием плановых функций задач четвертого типа является разработка оптимального варианта плана производства. К этому этапу должны быть разработаны плановые нормативы, достигнута основная балансировка плана и сформулированы критерии предпочтения вариантов.

Здесь достаточно эффективно могут использоваться линейно-программные модели и их системы, статистические модели с элементами оптимизации и т. д.

Наконец, назначение плановых функций задач пятого типа состоит в подготовке системы показателей, формировании плана и доведении его до исполнителей.

Каждый из охарактеризованных выше классов имеет собственные выходы, одновременно являющиеся входами в смежные классы: «цели и задачи» → «формирование допустимых альтернатив развития» → «формирование сбалансированных вариантов» → «выбор оптимального варианта функционирования развития объекта» → «принятие решения по плану».

§ 3. Нормирование производства и труда

Реальность и прогрессивность показателей плана во многом определяются исходными технико-экономическими нормами и нормативами. Правильно рассчитанный норматив вскрывает резервы производства и позволяет контролировать рациональность использования как живого труда, так и средств производства. А недостаточно точные и дифференцированные нормативы могут обесценить применение самых совершенных методов решения планово-экономических задач. В ряде случаев систему плановых нормативов можно построить на основе технологических и технических расчетов и теории данного процесса. Примером такого подхода могут быть расчеты режимов и нормативов обработки металлов резанием и т. п.

Однако в большом числе случаев отсутствует возможность прямого расчета. Особенно это относится к аппаратурным физико-химическим процессам, теория которых недостаточно разработана.

Серьезным недостатком традиционной методики разработки норм и нормативов является их практически полная ориентация на методы прямого счета. Между тем множественность факторов, воздействующих на результаты производства, существование значительного числа неконтролируемых вариаций факторов, невозможность получения пол-

ной информации предопределяет наличие значительного элемента статистической неопределенности в нормативах и нормах для непрерывных производственных процессов. Для такого рода процессов соответствующие технологические дисциплины и конкретная экономика в настоящее время не располагают достаточно точными, пригодными для повседневной плановой и аналитической практики методами расчета нормативов. Как правило, в формулы расчета нормативов входят величины, которые не поддаются точному теоретическому расчету. По существу, приводимые в литературе формулы представляют лишь описание порядка действий при расчете сводного показателя на основе частных. Например, норма часовой производительности сталеплавильной печи p равна весу плавки Q , деленному на длительность плавки t : $p = Q/t$.

Но основное содержание задачи как раз и заключается в установлении зависимости значений этих частных показателей (Q и t) от факторов производства. На практике эти величины определяются опытным путем и в лучшем случае отражают уже достигнутый средний уровень, что исключает возможность их использования для расчета нормативов на будущие периоды. Нужна разработка методики широкого использования методов математической статистики и оптимизации при обосновании норм и нормативов.

Сформулируем условия задачи. За некоторый период времени работы промышленного объекта определяется величина фактических удельных затрат (расход сырья, энергии, времени работы оборудования или рабочего на единицу продукции). Величина этих удельных затрат изменяется от одного периода времени к другому и от одного объекта к другому.

Для целей анализа и нормирования представляет интерес классификация источников возникновения вариации технико-экономических показателей, разложение вариации на части, обусловленное различными группами причин. С точки зрения нормирования можно выделить три группы причин вариации.

К первой группе относятся изменяющиеся во времени или пространстве условия производства, которые не зависят от работающего на данном производственном объекте коллектива. Они либо заданы на более высоких ступенях управления, либо регулируются по своей природе в пределах рассматриваемого периода.

Вторую группу составляют условия производства, которые в тех или иных границах может менять коллектив, об-

служивающий данный производственный объект. Это факторы автономного управления работой объекта.

И наконец, к третьей группе источников вариации относятся случайные, не поддающиеся контролю факторы. Их совокупное влияние определяет случайную ошибку при статистической оценке величины удельных затрат.

С достаточной для практики нормирования точностью можно считать указанные составные части общей вариации удельных затрат независимыми. В этом случае порядок их нормирования следующий.

Первая группа причин вариации должна учитываться при дифференциации нормативов по комплексам внешних условий производства. С изменением сочетания внешних условий должна меняться величина норматива. Таким образом, работа определенного объекта описывается системой нормативов.

Факторы автономного управления отражаются в системе нормативов через абсолютный уровень. Для установления уровня отдельных нормативов необходимо найти оптимальный вариант ведения производственного процесса.

Случайная вариация будет определять величину неустраиваемых, неизбежных на данном уровне технологии и организации производства отклонений от установленных нормативов и должна учитываться в оперативном планировании и управлении работой агрегатов. При большой случайной вариации показателей работы агрегатов нормативы должны устанавливаться как средние величины с указанием допустимых отклонений.

Рассмотрим пример. Разрабатывается система норм производительности дуговой электросталеплавильной печи, обслуживаемой бригадой рабочих. На величину производительности оказывает влияние целый ряд факторов: сортмент выплавляемых марок стали, способ выплавки, тип печи, величина и последовательность загрузки, величина подводимой мощности и характер ее изменения по ходу плавки, технологический режим плавки и т. д.

Первые три фактора (марка стали, способ выплавки, тип печи) являются заданными и не могут быть изменены бригадой. Влияние изменений этих факторов должно быть учтено системой градаций норм и нормативов, их соотношениями.

Остальные факторы бригада может регулировать в известных пределах. При разработке системы нормативов необходимо определить оптимальные с точки зрения принятого критерия значения этих факторов и на основе их регламента-

ции установить уровни норм. Действительно, на производительность дуговой электросталеплавильной печи оказывают влияние и марка стали, и характер использования мощности трансформатора. Необходимо оценить влияние на производительность как того, так и другого фактора. Однако полученные оценки различаются по характеру их использования. Влияние изменения марки стали определяется для того, чтобы учесть его при дифференциации норм и расценок. На основе же зависимости между производительностью агрегатов и подводимой мощностью выбирают выгодное значение энергетического режима, регламентируют его и учитывают при определении уровня норм, т. е. влияние этого фактора учитывается опосредованно, принятой величиной нормы.

Общую схему разработки системы норм можно представить следующим образом.

1. Каким-либо способом (на основе знания теории процесса, экспериментальными или статистическими методами) строится целевая функция (зависимость нормируемого показателя от факторов производства) и накладываются ограничения на переменные.

2. Определяются возможные сочетания неуправляемых факторов x_1, x_2, \dots, x_k , т. е. необходимая дифференциация норм.

3. Для каждого заданного сочетания неуправляемых условий производства задача решается на оптимум для набора управляемых факторов $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_{k+n}$.

4. Для удобства работы с системой норм определяются переводные коэффициенты как отношения расчетных норм к базисной норме.

Использование изложенного способа разработки системы норм на практике связано с известными трудностями.

Эти трудности двоякого рода. Во-первых, во многих случаях число необходимых градаций норм велико и, следовательно, для разработки системы норм потребуется большое число расчетов индивидуальных норм.

Вторая трудность методического характера. Дело в том, что в отдельных случаях построение полной целевой функции, дающей зависимость нормы от всех определяемых на данном уровне знания природы процесса факторов, не представляется возможным. Это часто приводит к тому, что величина переводных коэффициентов (т. е. соотношение норм) на практике оказывается недостаточно обоснованной, не точной. Последнее является причиной разной «жесткости» норм, возникновения «выгодных» и «невыгодных» работ, значи-

тельных скачков в уровне выполнения планов, расходования ресурсов (необоснованный перерасход или экономия).

С целью преодоления этих методических трудностей и снижения трудоемкости нормирования может использоваться другая, упрощенный метод построения системы норм.

Процесс нормирования при этом включает два основных этапа: на первом на основе анализа фактической информации методами математической статистики устанавливаются переводные коэффициенты, на втором методами оптимального технического нормирования определяется абсолютная величина нормы в условиях, принятых за базисные.

Этот метод нормирования предусматривает выполнение следующих действий.

1. В целевой функции $Q = f_1(x_1, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n}) + \epsilon$ полагают влияние групп неуправляемых и управляемых факторов независимым друг от друга. Переменные управляемые факторы x_{k+1}, \dots, x_{k+n} считают постоянными и принимают их значения на уровне фактически сложившихся в данной производственной обстановке.

Статистическими методами по данным текущего производственного учета устанавливается величина \bar{Q}_i , соответствующая практически возможным и необходимым сочетаниям неуправляемых факторов. Затем одно из сочетаний и соответствующее ему \bar{Q}_0 принимают за условную единицу и рассчитывают систему переводных коэффициентов.

2. Для сочетания условий $x^0_1, x^0_2, \dots, x^0_k$, принятых за базисные, решают соответствующую задачу на оптимум и определяют базисную норму N_0 .

3. На основе системы переводных коэффициентов и N_0 восстанавливают всю систему норм.

Следует отметить, что для выполнения ряда плано-экономических расчетов можно ограничиться только первым этапом работы — установлением системы переводных коэффициентов.

Как было сказано ранее, при разработке изложенного метода нормирования было сделано допущение, что влияние заданных неуправляемых и управляемых факторов на технико-экономические показатели независимо, т. е. отношение индивидуальных норм (N_i) к фактическим значениям экономических показателей (\bar{Q}_i) для всей системы норм будет одинаковым: $N_i/\bar{Q}_i = \text{const}$.

Практика плано-нормативной работы показывает, что это допущение достаточно близко к действительности,

и упрощенный метод обеспечивает получение сравнительно точной системы норм.

Далее, как показывают опыт исследовательских работ и данные литературных источников, относительные величины — переводные коэффициенты — значительно более устойчивы во времени, чем абсолютные значения технико-экономических показателей.

Сказанное заставляет рассматривать статистическую оценку переводных коэффициентов как важную самостоятельную задачу экономико-статистического исследования по разработке системы норм.

Исследование по определению величины переводных коэффициентов обычно включает несколько этапов. На первом этапе выявляются факторы, оказывающие влияние на нормируемые показатели, и производится их классификация на неуправляемые и управляемые. Затем осуществляется предварительное качественное агрегирование и определение нужных градаций регулируемых факторов.

Способы последующей обработки информации зависят от вида ее задания в учетной документации. Если исходная информация задана в явном виде, т. е. из материалов учета каждому определенному сочетанию неуправляемых факторов может быть поставлено в соответствие определенное фактическое значение нормируемого показателя, то используется следующая схема расчетов.

Какие-то условия принимаются за базисные. На основе первичной информации рассчитывается последовательность индивидуальных значений переводных коэффициентов для каждого сочетания неуправляемых условий производства. Затем исследуется поведение этой последовательности чисел во времени. При устойчивости во времени в качестве оценки нормативных значений коэффициентов может быть принято среднее значение ряда фактических значений. Если выявляется систематическая тенденция, то следует попытаться построить функцию математического ожидания от времени. Последний этап — статистическая проверка возможности дальнейшего агрегирования неуправляемых условий производства для уменьшения числа переводных коэффициентов.

При неявной форме задания информации фактические значения нормируемого показателя обычно учитываются не по сочетаниям неуправляемых условий производства, а по учетным периодам. В течение этого периода могут иметь место разные комбинации неуправляемых условий производства, и учетная величина показателя представляет собой какую-то среднюю или накопленную величину. В этом

случае возникает дополнительная статистическая задача по выявлению величины фактического показателя, соответствующей определенным значениям неуправляемых условий производства.

Методика статистического оценивания нормативов разного назначения и срока действия на предприятиях с непрерывным или периодическим характером производственного процесса более подробно изложена в работе [Розин и др., 1986].

§ 4. Управление и прогнозирование

Среди многочисленных задач управления непрерывными производствами нас в данном случае интересуют задачи регулирования производственного процесса, потоков материала и энергии на предприятии. Системы регулирования необходимы по той причине, что постоянно возникают нарушающие воздействия, которые вносят расстройтва в производственный ритм. Источник таких воздействий лежит за пределами прямого регулирования со стороны руководства производством. Как отмечает М. Старр [1968], «если бы руководитель производства был всемогущим, он устранил бы неблагоприятные нарушающие воздействия и способствовал бы появлению воздействий, выгодных по своим последствиям. Будь он всеведущ, он знал бы, какие и когда надвигаются нарушающие воздействия, и мог бы наилучшим образом подготовиться к ним. В действительности же возможности руководителя производства ограничены уровнем, на котором он в состоянии выполнять регулирование, причем под регулированием подразумевается умение приспособиться к нарушающим воздействиям путем уточнения стратегии управления объектом».

В качестве примера рассмотрим в общем виде модели, рассчитанные на ситуации, в которых известно, с какими нарушающими воздействиями может столкнуться производственная система, но не известна закономерность возникновения этих воздействий, и поэтому их нельзя предсказать. Этот случай надо четко отличать от такого, когда природа нарушающих воздействий тоже не известна. Во втором случае ни один из методов не пригоден, а результаты следует рассматривать как дело удачи или неудачи.

Абстрактная модель регулирования обобщенно выглядит следующим образом. Контролируемый орган обеспечивает сравнение требований, предъявляемых к производственной системе, с фактическими показателями работы. Если такое

сравнение производится лишь время от времени, система регулирования относится к системам с выборочными данными, для которых типичен периодический сбор сведений. Но в непрерывных производствах требуются в основном системы регулирования с непрерывными данными.

Контролирующий орган получает информацию трех видов.

1. Данные о выпускаемой системой продукции φ' , передаваемые посредством звена обратной связи.

2. Цели системы или нормативы производительности φ , задаваемые как цели, поставленные руководством производства, или как ожидаемые оценки производительности системы.

3. Внешние нарушающие воздействия θ_1 , например, такие, как прирост спроса $+\theta_1$ или его уменьшение $-\theta_1$, выражаемые отклонениями фактического спроса от среднего его уровня.

Если выпуск продукции φ'' совпадает с общим размахом спроса $\varphi \pm \theta_1$, нет надобности ни в каких корректирующих действиях. В системе необходимо предусматривать средства, контролирующие (на базе выборочных или непрерывных данных) величины $(\varphi = \theta_1) - \varphi'' = \varepsilon$, где ε — сигнал ошибки.

Пусть система запроектирована так, что $\varphi'' = \varphi$. Тогда при $\theta_1 = 0$ имеем $\varepsilon = 0$, и никакие корректирующие действия не требуются. Однако если $\theta_1 \neq 0$, то контролирующий орган отмечает несоответствие и порождает сигнал ошибки, который вызывает соответствующие корректирующие действия.

Сигнал ошибки дается, если:

1) в результате внешнего воздействия в системе возникает нарушение, т. е. $\theta_1 \neq 0$;

2) руководство производства изменило свои цели и соответственно изменилось значение φ .

Производственная система включает регулятор, выполняющий корректирующие действия на основе принятия решений. Он предназначен для преобразования сигнала ошибки в соответствующие действия, регулирующие систему $\varphi'' = f(\varepsilon)$, а последние, в свою очередь, осуществляют требуемые изменения процесса. Регулирующий орган получает и интерпретирует все различные ε — сигналы, которые могут возникнуть.

Сигнал ошибки представляет собой функцию норматива φ , установленную для системы, размера ее продукции φ'' и уровня внешнего нарушающего воздействия θ_1 . Если

$\theta_1 = 0$, система работает в соответствии с заданными ей нормативными требованиями, следовательно, $\varphi = \varphi''$ и $\varepsilon = 0$. Если θ_1 получает значение, отличное от нуля, то

$$\varepsilon = (\varphi \pm \theta_1 - \varphi'') \neq 0,$$
$$\varphi'' = f(\varepsilon) \neq 0.$$

Для нейтрализации нарушающего воздействия уточненный норматив φ' вносит изменения в процесс, что приводит к новому значению φ'' , и ошибка ε начинает смещаться в сторону от нуля. Такого рода модели применимы независимо от того, известны или нет вероятности нарушающих воздействий.

Во всех системах оперативного управления особая роль принадлежит статистическому прогнозированию, служащему основой принятия упреждающих управленческих решений. Содержание подхода к управлению в этом случае заключается в опережающем процессе производства анализе показателей функционирования агрегатов и подразделений при возмущающих внешних и внутренних воздействиях, в оценке на этой основе как самих оперативных планов, так и процессов регулирования.

Для объективного обоснования принимаемых управленческих решений нужны заблаговременные оценки их возможных и наиболее вероятных результатов. Оперативные прогнозы — не изобретение последних лет, они имеют длительную историю. Дело в том, что управлять производственно-хозяйственной деятельностью без прогнозов нельзя. В экономике существуют процессы и явления, будущего которых мы не знаем, но они имеют тем не менее важное значение для решений, принимаемых в настоящем. Большинство таких решений принимается в условиях неопределенности. Прогнозирование выступает как один из инструментов уменьшения (минимизации) этой неопределенности.

Принципиальная возможность прогнозирования основывается на предположениях о закономерном характере изменения различных абсолютных и относительных показателей и на определенной инерционности экономических процессов. Инерционность в данном случае означает невозможность на небольшом отрезке времени коренным образом изменить технологическую структуру производственных процессов.

Прогноз можно считать специфической моделью развития производственной системы. Любое будущее состояние системы прогноз рассматривает как результат ее предшествующих состояний и комплекса условных допущений, кото-

рые не вытекают однозначно и непосредственно из знания прошедшего. Таким образом, модель прогноза есть модель имплицативного типа, построенная по схеме: «если, ..., то». Очевидно, что будущее нельзя ни наблюдать, ни измерять. Будущее можно лишь предвидеть при определенных предпосылках. Если предпосылка изменяются, то автоматически изменяются и результаты прогноза.

Статистическое прогнозирование экономических показателей представляет собой многошаговую процедуру и в общем случае включает следующие этапы:

- конструирование модели прогноза;
- оценку значений независимых переменных модели на момент прогнозирования и собственно прогноз;
- анализ точности и систематическую корректировку методики прогнозирования.

Для конструирования статистических моделей прогнозирования могут быть использованы различные математико-статистические подходы. Следует отметить, что при любом способе статистического прогнозирования принимается какая-нибудь гипотеза о стабильности: либо это относится к самой прогнозируемой величине, либо к закону ее изменения, либо к ее взаимосвязи с другими величинами и т. д.

Гипотеза о допустимом периоде экстраполяции тех или иных выявленных закономерностей разрабатывается на основе технико-экономического анализа производственных процессов. Некой формальной проверкой непротиворечивости этой гипотезы может быть статистическое исследование поведения этих закономерностей в прошлом. Особую трудность для статистического прогнозирования представляет оценка новых процессов в развитии производства, которые в данный момент занимают незначительное место, но в будущем могут определять тенденцию.

В этих случаях наряду с аналитической и расчетной работой неизбежно использование экспертных оценок.

К первой группе методов прогнозирования относятся методы анализа одномерных временных рядов. Они основаны на анализе и экстраполяции собственной предыстории экономических показателей без выявления причин их изменения во времени. В этом случае принимается постулат об устойчивости закона изменения показателя во времени.

Вторая группа методов прогнозирования — методы анализа многомерных динамических рядов — делает упор на экстраполяции зависимости между экономическими показателями и производственными факторами, т. е. прогнозирование ведется по двухэтапной схеме. Двухэтапная мо-

дель для прогнозирования имеет то преимущество перед моделями, опирающимися только на анализ временных рядов, что она учитывает кроме характера изменения показателей во времени еще и влияние других переменных на функцию. При этом постулируется, что выявленные экономико-статистическим анализом зависимости показателей от факторов производства либо в неизменной, либо в хорошо экстраполируемой форме пригодны для использования в будущем периоде.

В основе классификации моделей прогнозирования лежит также и объект моделирования. По этому признаку различаются динамические модели отдельного объекта и динамические модели совокупности объектов.

К оцениванию независимых переменных модели на момент прогнозирования нужно подходить дифференцированно. Наиболее устойчивы во времени и, следовательно, легче поддаются прогнозу природно-географические условия производства. К следующей по степени устойчивости группе условий производства можно отнести характеристику запасов полезных ископаемых. К третьей группе независимых переменных, для которых при прогнозе можно оценить только допустимый интервал значений, относятся объем производства и соответствующие ему мощности. Конкретные их значения определяются в ходе решения задачи более высокого уровня (например, при составлении отраслевого плана). Наиболее сложно оценить факторы, на которые значительное влияние оказывает технический прогресс: качество основных фондов, характер технологического процесса, уровень организации и управления производством и др. Плавный технический прогресс в пределах уже освоенных технологических способов производства можно попытаться учесть введением в модель фактора времени, а также характеристик уровня.

Анализ точности прогнозирования и его корректировка. Исходя из вероятностной природы прогнозов всегда следует ожидать расхождения между прогнозом и его реализацией. К основным причинам их рассогласования можно отнести следующие: неоправдавшиеся общие посылки; недостаточность или качественная неполноценность исходной информации; неадекватность принятой модели прогноза; погрешность в математико-статистической обработке данных.

Переходя к рассмотрению статистических способов анализа точности прогноза, следует заметить, что любые оценки по статистической модели можно трактовать как прогнозные, так как по существу процесс расчета по модели

есть условная оценка величины показателя при данных значениях факторов производства. Подразделение расчетов по модели на оценочные и прогнозные производится исходя из принадлежности или непринадлежности объектов к анализируемой совокупности. Если расчеты производятся по объектам, входившим в исходную совокупность, то это операция оценки (аппроксимации), в противном случае имеем дело с прогнозом: пространственным, временным, пространственно-временным. Следует использовать единый методический подход к анализу точности аппроксимации и прогнозирования по статистической модели.

В основе подхода лежит исследование отклонений расчетного значения показателя (\hat{y}_i) от фактического (y_i): $\Delta_i = \hat{y}_i - y_i$. Наиболее распространенными показателями общей точности моделей по всем исследуемым пространственно-временным реализациям является среднеквадратическая ошибка. В отдельных случаях полезно дополнить модель расчетов средней относительной ошибки и диапазоном вариации ошибок. Эти общие характеристики точности модели могут выступать как критерии сравнения различных типов моделей. Однако для обоснованного выбора наилучшего вида модели и ее корректировки общие усредненные показатели точности должны быть дополнены анализом характера расположения в пространстве и во времени индивидуальных ошибок. Исследование индивидуальных отклонений (Δ_i) позволяет сделать целый ряд полезных выводов о точности прогноза и адекватности модели. Такое исследование удобно начинать с графических методов анализа — построения графика «прогноз — реализация» [Тейл, 1970]. Биссектриса координатного угла графика — это линия совершенных прогнозов. По характеру расположения точек относительно этой линии можно сделать ряд заключений о точности прогнозов. В частности, расположение точек над линией совершенных прогнозов соответствует переоценке уровня показателя, под линией — недооценке. Далее, если точки по ту или иную сторону линии совершенных прогнозов располагаются сериями, скоплениями и эти серии не случайны, то это означает зависимость ошибки прогноза от положения объектов по оси расчетных показателей, т. е. систематическую погрешность моделей в определенных областях признакового пространства.

Для корректировки прогноза (или его методики) большее значение имеет не только анализ графика «прогноз — реализация», но и исследование зависимости отклонений от других факторов. Здесь часто оказывается полезным исследова-

дование связи отклонений со временем. Факт систематического изменения ошибок во времени свидетельствует о необходимости либо корректировки самого прогноза, либо корректировки модели. Корректировка прогноза может, например, осуществляться путем построения функции ошибки прогноза от времени (в виде явной функции, авторегрессионной схемы либо их комбинации) и введения соответствующей поправки в прогноз.

Сделаем одно общее замечание, относящееся к учету действия «фактора времени». «Фактор времени» — это своеобразный общий фактор, аккумулирующий (опосредующий) в себе влияние целого комплекса реальных причин развития процесса (частью измеримых, частью неизмеримых). В этом плане можно провести аналогию между «фактором времени» и географическим положением предприятия, за которым (особенно в добывающих отраслях) также стоит целый комплекс реальных факторов производства. Нагрузка на «фактор времени» в моделях во многом зависит от их структуры: чем больше факторов развития удастся ввести в модель в явном виде, тем меньше нагрузка на «фактор времени». Однако устранить полностью влияние этого косвенного измерителя невозможно, так как в нем выражается действие ряда неизмеримых факторов (например, изменение квалификации работников, их целевых установок и т. п.).

Время в моделях экономических показателей работы промышленных объектов может выступать в двух формах: в форме календарного времени (тогда начальная точка отсчета одинакова для всех объектов совокупности) и в форме «возраста» предприятия, времени его функционирования. В этом случае начальные точки отсчета различны для объектов, введенных в эксплуатацию в разные периоды.

На первый взгляд может показаться, что эти две формы измерения времени дублируют друг друга. Между ними действительно существует тесная взаимосвязь, однако они несут неодинаковые смысловые нагрузки. Календарное время, введенное в модель, попросту «впитывает» в себя все, что связано с тенденцией развития моделируемого объекта и не нашло явного отражения в независимых переменных модели. «Возрастной» фактор дифференцирует объекты с одинаковым значением календарного времени на разные «поколения», тем самым учитывая в неявной форме многие качественные моменты, отличающие их друг от друга. В то же время измеритель «время функционирования объекта» — характеристика комплексная, непосредственно отражающая

процесс «старения» объекта и косвенно — его технико-организационный уровень. При моделировании можно попытаться разделить эти две сферы действия фактора «возраста», для чего включить в модель показатели года ввода объекта в эксплуатацию и его относительного «возраста».

Отметим еще один момент, связанный с измерением фактора времени. В некоторых случаях целесообразно вместо его явного введения в модель использовать довольно тесно коррелированный с ним показатель номера события в изучаемой последовательности производственных актов. Различие между этими двумя хронологическими показателями заключается в том, что время, как правило, квантуется равномерно, а длительность определенных производственных операций в их последовательности обычно варьирует.

В практике оперативного планирования и управления для периодических процессов наиболее распространен прогноз длительности и времени окончания операций. Пример прогнозирования длительности и времени окончания плавки в сталеплавильных печах. Необходимый составной элемент системы ежесуточного планирования и управления работой комплекса мартеновских печей — прогноз длительности плавки и времени их выпуска. Ввиду значительного влияния возмущений на работу печей возникает также необходимость корректировать принятые оперативные решения, не дожидаясь их полной реализации. Поэтому следует различать прогнозирование длительности плавки до ее начала и прогнозирование времени выпуска текущей плавки. Приводимая методика прогнозирования длительности плавки базируется на математико-статистическом анализе более 3 тыс. плавки Кузнецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов.

Вполне понятно, что при разработке модели прогноза в основе классификации факторов вариации показателя должны лежать возможность предсказания их значений и время, когда такое предсказание может быть сделано. С этой точки зрения могут быть выделены четыре группы факторов.

В первую группу отнесены факторы, конкретные значения которых либо точно известны, либо заданы до начала плавки (марка стали, способ выплавки, номер печи и т. п.). Большинство этих факторов носит дискретный характер.

Вторую группу составляют факторы, у которых наблюдались закономерные изменения во времени, и есть основания предположить сохранение этой закономерности на период прогнозирования. Главным здесь является износ пе-

чей. Сюда же можно отнести и другие систематические изменения условий работы печей во времени.

К третьей группе относятся факторы, конкретные значения которых становятся известными лишь в процессе плавки (последовательность и скорость забалки шихтовых материалов, химический состав жидкого чугуна, длительность отдельных операций и т. п.). Характерным для этой группы факторов является то, что до начала плавки может быть установлен лишь закон их распределения. Однако по ходу плавки значения факторов поддаются измерению и становятся известной их конкретная величина.

Четвертая группа — не поддающиеся измерению и учету возмущения в ходе процесса плавки.

Для упрощения последующего изложения назовем: первую группу факторов — «заданные условия производства», вторую — «влияние фактора времени», третью — «индивидуальные различия» параметров ведения плавки и четвертую — «неконтролируемые параметры».

Ясно, что при прогнозе длительности плавки до ее начала в какой-то мере могут быть учтены значения факторов первых двух групп. После исключения с помощью системы переводных коэффициентов влияния заданных условий производства данные о длительности последовательных плавков на определенной печи представляют собой временной ряд, приведенный к базисным условиям.

Один из основных статистических приемов исследования временных рядов — это разложение их на компоненты. Вначале проверим более простую гипотезу о структуре ряда. Будем считать, что длительность последовательных плавков представляет собой суммарный результат воздействия долговременной тенденции, определяемой систематическим изменением состояния печи по ходу кампании и случайной компоненты ε , отражающей воздействие индивидуальной и случайной вариаций параметров плавков. Принятие этой гипотезы означает описание ряда двухкомпонентной моделью вида $\hat{t}_j = f(n) + \varepsilon$, где n — номер плавки от ближайшего холодного или большого горячего ремонта.

Общий характер изменения длительности плавки по ходу кампании достаточно хорошо изучен. Теоретический анализ и рассмотрение эмпирических рядов показывает, что в качестве уравнения связи для каждого межремонтного периода может быть принята парабола второго порядка. Тенденция за всю кампанию характеризуется несколькими параболой. Для одной из 400-тонных мартеновских печей Кузнецкого металлургического комбината уравнения регрессии

имели следующий вид:

1-й межремонтный период

$$\hat{t}_j = 637,9 - 1,068n + 0,009n^2;$$

2-й межремонтный период

$$\hat{t}_j = 702,8 - 0,831n + 0,006n^2.$$

Таким образом, тенденция в изменении длительности плавков довольно ясно выражена. Но средняя скорость изменения длительности плавков вследствие «старения» печи сравнительно невелика. Изменение длительности каждой последовательной плавки в среднем за счет «старения» печи составляет порядка 0,2—0,3 мин.

Для решения вопроса, достаточна ли парабола 2-го порядка для аппроксимации ряда или следует использовать более сложную модель, можно прибегнуть к исследованию автокоррелированности остаточных отклонений. Расчет значений коэффициентов автокорреляции показал, что они значимы при небольших сдвигах (4—5 плавков) и, следовательно, модель включающая авторегрессионные преобразования, предпочтительнее. Для одной из 400-тонных печей ММК модель имела следующий вид:

$$\hat{t}_j = 605 - 0,97n + 0,007n^2 + 0,14t_{j-2} + 0,02t_{j-3} + \\ + 0,06t_{j-4} + t_{j-5} + 0,03t_{j-6}.$$

Из уравнения видно, что для коротких периодов времени влияние тенденции сказывается относительно слабо. В подтверждение приведем для этой же печи уравнение регрессии, не включающее номер плавки

$$\hat{t}_j = 256 + 0,25t_{j-2} + 0,10t_{j-3} + 0,12t_{j-4} + \\ + 0,10t_{j-5} + 0,08t_{j-6}.$$

Основная нагрузка при аппроксимации, особенно на коротких участках ряда, приходится на авторегрессионную часть, описывающую связь последовательных плавков.

Анализ результатов моделирования длительности последовательных плавков на мартеновских печах позволяет сформулировать следующие выводы:

учет влияния заданных условий производства может осуществляться с помощью стабильной системы переводных коэффициентов, корректируемой 1—2 раза в год. При этом используется трехэтапная схема прогноза длительности плавки. На первом этапе информация о длительности предыдущих плавков при помощи коэффициентов приводится к

базисным условиям. На втором этапе оценивается вероятный уровень длительности прогнозируемой плавки в базисных условиях, т. е. осуществляется учет динамики процесса. На третьем — от прогноза в базисных условиях переходят к прогнозу в запланированных условиях;

несмотря на устойчивость регрессионных моделей, они не могут использоваться в качестве инструмента прогноза длительности плавки, так как величина параметров моделей для каждой печи и периода различны. Для краткосрочного прогноза должна использоваться адаптивная модель, параметры которой ежедневно изменяются.

Учитывая сравнительно небольшую скорость изменения длительности плавки по ходу кампании, можно на коротких участках считать процесс стационарным и строить модель прогноза длительности j -й плавки в виде функции длительности предшествующих плавки. Простейшей формой такой адаптивной модели прогноза может служить скользящая средняя, но используемая не для выравнивания существующего ряда, а для прогноза уровня ближайших будущих членов:

$$\hat{t}_j = \sum_{i=1}^{m+1} t_{j-i}/m,$$

где \hat{t}_j — прогноз длительности j -й плавки; t_{j-i} — фактическая длительность $(j-i)$ -й плавки.

Такой способ прогноза учитывает основные «накопленные» тенденции, пренебрегая лишь тенденцией за небольшой промежуток времени, примыкающий к прогнозируемой плавке.

Одним из важных вопросов при этом является установление оптимальной протяженности скользящей средней m . Наличие оптимума значения m обусловлено его противоречивым воздействием на точность прогноза. Для определения оптимальной протяженности средней в условиях мартеновского производства рассматриваемых в примере комбинатов была проведена серия ретроспективных расчетов. Использовались два метода оценки точности прогнозов при различных значениях m : 1) расчет коэффициентов корреляции между предсказанной и фактической длительностью плавки; 2) расчет среднеквадратического отклонения предсказанной длительности от фактической (среднеквадратичная ошибка прогноза).

Величина коэффициентов корреляции между предсказанной и фактической длительностью плавки для средних раз-

ной протяженности по одной из мартеновских печей большой емкости составляет:

Протяженность средней (m), ч	
2	0,34
5	0,58
10	0,62
15	0,64

Анализ результатов расчетов показал, что для однотипных печей имеется общий интервал значений m , обеспечивающий максимальную среднюю точность прогноза. Для 400-тонных печей оптимальные значения m должны выбираться в пределах от 10 до 20 плавки.

Большую точность прогноза может дать модель, включающая длительность предшествующих плавки с определенными весами:

$$\hat{t}_j = \sum_{i=2}^{m+1} p_{j-i} t_{j-i},$$

где p_{j-i} — вес длительности $(j-i)$ -й плавки при прогнозе $\left(\sum_{i=2}^{m+1} p_{j-i} = 1 \right)$.

Для корректировки прогноза по ходу плавки могут использоваться факторы «индивидуального различия» параметров ведения плавки по мере того, как их конкретные значения становятся известными. Для этого применяется метод ступенчатой корректировки прогноза времени выпуска плавки, сущность которого заключается в том, что оценка времени выпуска плавки корректируется периодически, по мере прохождения процесса через определенные критические точки. В качестве таких точек целесообразно принять время окончания отдельных периодов плавки, когда происходит резкое увеличение объема известной информации.

Для скрап-рудного процесса могут быть выделены три основных периода: заправка и завалка шихты $t_j^{(1)}$, плавление $t_j^{(2)}$, доводка $t_j^{(3)}$ и соответственно установлены следующие критические точки процесса плавки:

- τ_0 — начало плавки;
- τ_1 — окончание заливки чугуна;
- τ_2 — окончание плавления;
- τ_3 — выпуск плавки.

Принятие такой системы критических точек приводит к следующим трем видам оценки времени выпуска плавки $\tau_3^{(1)}$, $\tau_3^{(2)}$, $\tau_3^{(3)}$:

Момент предказания (τ_i)	Подлежит оценке \widehat{t}_j	Прогнозируемое время выпуска плавки τ_3
В период заправки и завалки $\tau_0 < \tau_i \leq \tau_1$	Длительность всей плавки $\widehat{t}_j^{(0)}$	$\tau_3^{(1)} = \tau_0 + \widehat{t}_j^{(0)}$
В период плавления $\tau_1 < \tau_i \leq \tau_2$	Суммарная длительность плавления и доводки $\widehat{t}_j^{(2)} + \widehat{t}_j^{(3)}$	$\tau_3^{(2)} = \tau_1 + \widehat{t}_j^{(2)} + \widehat{t}_j^{(3)}$
В период доводки $\tau_2 \leq \tau_i < \tau_2 + a$	Длительность доводки $\widehat{t}_j^{(3)}$	$\tau_3^{(3)} = \tau_2 + \widehat{t}_j^{(3)}$

Здесь a — время, в течение которого еще целесообразно осуществлять корректировку предшествующего прогноза.

Таким образом, первая корректировка прогноза времени выпуска производится сразу после начала плавки и заключается в привязке ранее полученной оценки ее длительности к текущему времени. При второй и третьей корректировке уточнение прогноза происходит за счет двух факторов: учета фактического времени начала отдельных периодов и более точного прогноза длительности оставшейся части плавки. Решение последней задачи сводится к построению моделей для оценки суммарной длительности периодов, оставшихся после перехода определенной критической точки.

РАЗДЕЛ II

ОПЫТ РЕШЕНИЯ ТИПИЧНЫХ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

Глава 5

ВЫБОР ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ

§ 1. Постановка задачи

Экономические показатели предприятий с аппаратурным характером производства в значительной степени определяются технологическими режимами основных переделов. Характерным для аппаратурных физико-химических производств является многозначность возможных вариантов ведения производственного процесса. С изменением значений технологических параметров и их сочетаний изменяются производительность агрегатов, расход сырья и основных материалов, энергетические затраты и в конечном счете объем производства и удельные затраты на получение продукции.

Определение наиболее рациональных параметров технологического процесса на отдельных переделах можно проводить на основе статистического анализа производственной информации.

Постановка и решение этой задачи предполагает выявление взаимосвязей конечных результатов деятельности предприятий с технико-экономическими показателями функционирования основных переделов, выбор критериев оптимизации технологического режима, выделение объектов оптимизации и построение их моделей, определение допустимых областей изменения отдельных параметров, а также анализ экономических последствий изменения технологических режимов.

Методику решения сформулированной задачи покажем на примере выбора экономически выгодных параметров ведения процесса биосинтеза на предприятии микробиологической промышленности.

В работе проводится детальный экономический анализ процесса производства антибиотиков, включающий выбор

общезаводского критерия оптимизации производственного процесса, выявление взаимосвязи общего критерия с технико-экономическими показателями основного производственного передела, нахождение зависимостей затрат от объемов производства продукции.

Построены экономико-статистические модели основной стадии получения антибиотика — процесса микробиологического синтеза (ферментации). На основе применения методов спектрального анализа осуществлена типизация процессов ферментации по особенностям их протекания, исследуются основные причины, вызывающие неодинаковость протекания биосинтеза, даны рекомендации по повышению производительности цеха ферментации. Приводятся технико-экономические модели основных типов процессов, позволяющие оценивать экономическую эффективность различных производственных решений. Дан подробный анализ основных результатов исследования с выделением главных факторов повышения эффективности производства и рассмотрены пути воздействия на них с помощью внутрипроизводственных резервов.

Дальнейшее изложение материала целесообразно представить кратким описанием производственного процесса на анализируемом предприятии.

§ 2. Краткая характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования рассматривался производственный процесс на Новосибирском заводе медицинских препаратов (НЗМП) Минмедбиопрома СССР, специализирующемся на производстве антибиотиков.

Основным продуктом производства НЗМП является хлортетрациклин-гидрохлорид (ХТЦ), из которого на других предприятиях Минмедбиопрома СССР производятся готовые лекарственные препараты. По имеющимся данным потребности в ХТЦ удовлетворены в стране не более чем на 20 %, и объем его производства на заводе определяется государственным заказом. Поскольку рассматриваемый антибиотик в настоящее время используется преимущественно в животноводстве, то увеличение его выпуска, помимо повышения эффективности собственного производства, даст существенный народнохозяйственный эффект в аграрно-промышленном комплексе.

Из отходов основного производства на заводе выпускается два вида биологически активных препаратов (биовит-40

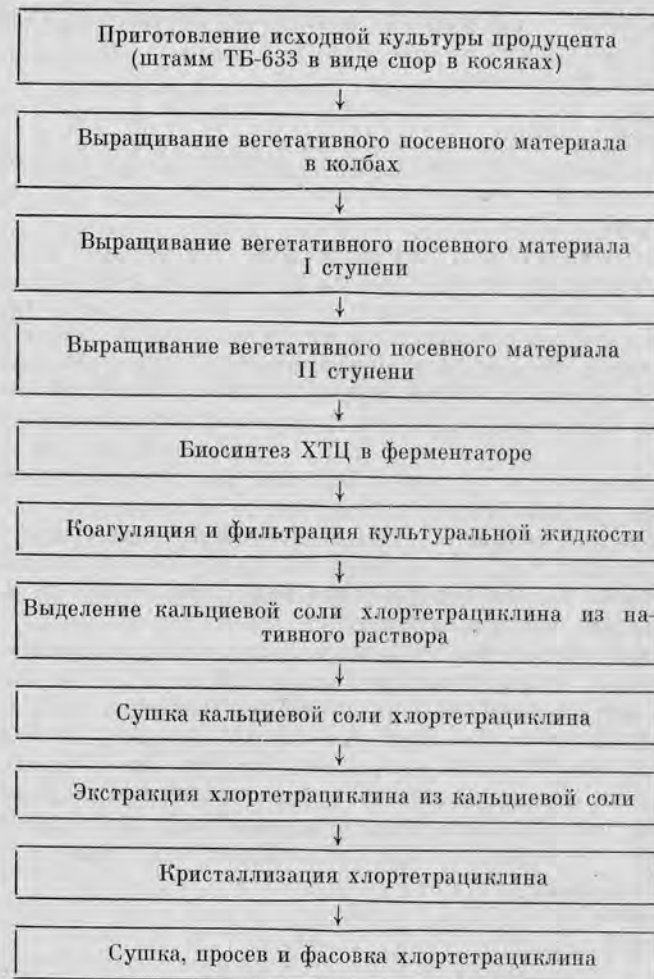


Схема 5.1. Основные стадии технологического процесса получения хлортетрациклина гидрохлорида (ХТЦ) на Новосибирском заводе медпрепаратов

и биовит-80), потребность в которых в сельском хозяйстве высока и также полностью не удовлетворяется.

Предприятия, специализирующиеся на производстве препаратов микробиологического синтеза, имеют типовую технологию основного производства:

приготовление питательной среды;
микробиологический синтез (стадия ферментации);

выделение и химическая очистка антибиотика из культуральной жидкости;
 концентрирование;
 сушка;
 стандартизация;
 приготовление готовых лекарственных форм (таблеток, мазей, инъекционных препаратов и т. п.);
 упаковка.

В зависимости от биологической природы продуцента и требований технологического регламента характер оборудования на каждой стадии может изменяться. В целом производственный процесс на технологической линии осуществляется посредством биохимических, микробиологических, химико-физических воздействий на исходное сырье с целью получения готового продукта с заданными свойствами.

Технологическая схема производства укрупненно представлена на схеме 5.1.

Ключевым звеном в технологической цепи является операция биосинтеза ХТЦ в ферментаторах. Все последующие операции — это химическая очистка антибиотика и доведение его до товарного вида.

Процесс биосинтеза хлортетрациклина гидрохлорида осуществляется в ферментаторах емкостью 15 м³, 50 и 63 м³. В цехе ферментации находится 10 ферментаторов емкостью 15 м³, 4 — 50 м³ и 4 — емкостью 63 м³. Процесс биосинтеза продолжается 75—100 ч при температуре 29—33 °С и непрерывном перемешивании. Процесс ферментации изображен на схеме 5.2. Выходным продуктом на стадии фермента-



Схема 5.2. Укрупненная схема процесса ферментации

ции является культуральная жидкость (КЖ), качество которой измеряется накопленной активностью.

Активность культуральной жидкости является важным результирующим показателем передела биосинтеза, от которого зависит активность конечных продуктов производства — хлортетрациклина и биовитов, а также производительность передела и удельные затраты на производство культуральной жидкости.

В рассматриваемом примере подробно анализируется основной процесс микробиологического производства — ферментация и его влияние на конечные результаты деятельности завода.

§ 3. Выбор критерия оптимизации производственного процесса на предприятии. Взаимосвязь общего критерия с технико-экономическими показателями основного передела

Из анализа условий работы предприятия следует, что основными критериальными экономическими показателями его деятельности могут выступать: объем производства, качество продукции и прибыль. Поскольку объем производства на НЗМП задан государственным заказом и должен максимизироваться исходя из народнохозяйственных потребностей, а качество, главным образом, определяется техническими условиями производства и регламентируется соответствующим ГОСТом, то основным критериальным показателем, подлежащим оптимизации, является годовая прибыль (P):

$$P = \sum_{i=1}^k (V_i - C_i) q_i,$$

где q_i — объем производства i -го продукта; C_i — себестоимость производства i -го продукта; V_i — цена i -го продукта; k — число выпускаемых продуктов.

Рассмотрим основные направления воздействия на величину прибыли.

1. Изменение долей производимых конечных продуктов при условии их различной прибыльности. На НЗМП себестоимость хлортетрациклина составляет примерно 64 руб. на 1 млрд ед. активности, а по биовитам — 19 руб. С учетом цены конечного продукта хлортетрациклина (85 руб. за 1 млрд ед. активности) и биовитов (32 руб.) прибыль при ре-

лизации этой продукции составит соответственно 21 и 13 руб. Т. е. наибольшую прибыль заводу приносит производство именно основного продукта — хлортетрациклина. Таким образом, воздействие на рост прибыли через изменение долей производимых конечных продуктов в условиях исследуемого объекта крайне ограничено.

Рассмотренный путь повышения эффективности производства, по существу, связан с организацией производственного процесса через один параметр — объем произведенной культуральной жидкости и зависит от общеэкономической ситуации и внешних условий функционирования предприятия.

2. Выпуск продукции более высокого качества при условии дифференциации цен. В настоящее время такой дифференциации цен нет. Качество конечного продукта при фиксированных единых ценах выступает лишь как ограничение. Его влияние на величину прибыли сказывается через объем забракованной продукции.

3. Увеличение объема производства. Его влияние сказывается, во-первых, непосредственно — на общей массе прибыли; во-вторых, через снижение себестоимости за счет уменьшения условно-постоянных расходов на единицу выпуска продукции.

Объем производства всех видов рассматриваемых конечных продуктов, по существу, определяется объемом производства культуральной жидкости $\sum_{i=1}^k q_i = \sum_i A_i \gamma_i$, где γ_i — коэффициенты выходов годного на переделах; A_i — объемы производства полупродуктов каждого передела.

Это выдвигает цех ферментации в число производств, определяющих общую эффективность работы предприятия.

Объем производства культуральной жидкости исходя из специфики процесса микробного синтеза должен соответствовать количеству и качеству производимого полупродукта. Этому способствует измерение его в таких единицах, как суммарная произведенная активность (млрд единиц). Объем представляет собой произведение биологической активности культуральной жидкости a_j (основная характеристика качества) на произведенную массу M_j на каждом типе ферментов, $A = \sum_{j=1}^3 a_j M_j$.

Основные параметры, позволяющие управлять объемом производства — это качество культуральной жидкости a_j (активность единицы массы КЖ), время ферментации $t_{\phi j}$,

время простоя ферментеров t_{sj} , структура работающих ферментеров по типам и коэффициент выхода годного хлортетрациклина из культуральной жидкости γ .

Из перечисленных управляемых параметров непосредственно с технологическим режимом связаны a_j и $t_{\phi j}$ и опосредованно — γ , через зависимость от активности a_j .

Таким образом, задача экономико-статистического исследования взаимосвязей объемов производства и параметров технологического процесса заключается в построении следующих трех функций:

$$a_j = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

$$t_{\phi j} = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

$$\gamma = f_3(a_j),$$

где x_1, \dots, x_n — параметры технологического режима.

4. Снижение удельных затрат (себестоимости) на производство продукции. При анализе этого вопроса целесообразно выделить для рассмотрения два объекта — затраты на переделе «ферментация» культуральной жидкости и затраты на последующих стадиях технологического цикла. Это деление обусловлено тем, что в основном параметры технологического процесса влияют на затраты на участке ферментации, который является главным звеном в технологической цепочке, во многом определяющим эффективность функционирования последующих переделов.

По характеру взаимосвязей с параметрами технологического процесса все статьи затрат можно подразделить на две группы: «сырье и основные материалы» и прочие затраты.

Основной путь снижения удельных затрат сырья и основных материалов — увеличение выхода культуральной жидкости с операции на единицу сырья. Это путь, по существу, сводится к повышению активности полупродукта. Действительно, если при неорганических процессах химического синтеза снижение удельных затрат сырья происходит в основном лишь за счет снижения потерь, то в рассматриваемом процессе биоорганического синтеза — за счет создания благоприятных условий для жизнедеятельности бактерий. Если в неорганическом синтезе компоненты сырья входят в состав конечного продукта, то здесь сырье выступает элементом среды жизнедеятельности микробов и в конечный продукт входит лишь опосредованно.

Таким образом, в рассматриваемом процессе удельные затраты сырья и основных материалов при относительном постоянстве загрузки и коэффициента выхода годного яв-

ляются функцией активности: $z_c = f_4(a_j)$. Отсюда вытекает и задача экономико-статистического моделирования процесса ферментации: построение зависимости активности культуральной жидкости от параметров технологического процесса $a_j = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$, что, по существу, совпадает с задачей моделирования, рассмотренной в п. 3.

Прочие статьи затрат в основном связаны с технологией производственного процесса через объем производства. Его рост вызывает снижение условно-постоянных расходов на единицу продукции.

При определении влияния параметров технологического процесса на показатель эффективности производства (прибыль) для передела «ферментация» необходимо построить следующие экономико-статистические модели:

- 1) зависимости активности культуральной жидкости от параметров процесса микробиологического синтеза;
- 2) зависимости времени ферментации от параметров процесса биосинтеза;
- 3) взаимосвязи активности культуральной жидкости и длительности ферментации.

§ 4. Анализ зависимостей статей затрат от объемов производства на переделе «ферментация»

С целью выявления доли условно-постоянных расходов в отдельных статьях затрат проведено два статистических исследования.

В основе первого лежит следующая идея. В анализируемом периоде имел место систематический рост объемов производства. В этом случае исследование динамики общей суммы затрат по отдельным статьям позволяет сделать вывод о характере их взаимосвязи с объемом производства. Здесь следует различать три ситуации. Первая — сумма затрат постоянна или их изменение во времени является статистически незначимым. В этом случае эти затраты либо полностью, либо в подавляющей своей части являются условно-постоянными.

Вторая ситуация — сумма затрат растет во времени, однако темп ее роста меньше, чем темп роста объемов производства. Следовательно, лишь определенная часть этих затрат может быть отнесена к условно-постоянным.

И наконец, третья ситуация — несмотря на рост объемов производства сумма затрат значимо уменьшается. Здесь помимо условно-постоянных расходов сказывается влияние

прямых снижений норм расходов, цен, тарифов и т. п., что требует специального рассмотрения по каждому случаю.

Второй метод исследования заключается в построении статистических зависимостей удельных затрат от объемов производства. В данном случае доля условно-постоянных расходов ориентировочно может быть определена по коэффициенту детерминации (чем он выше, тем меньше доля условно-постоянных расходов).

Сопоставление результатов обоих подходов позволяет установить долю условно-постоянных расходов и величину затрат при различных объемах производства.

$$z_j = z_j^{\text{пост}}/A + z_j^{\text{перем}}$$

В общей сумме затрат на производство культуральной жидкости наиболее значимы сырье и основные материалы, эксплуатация оборудования, воздух, пар, цеховые расходы и основная заработная плата. На долю указанных статей приходится 91 % всех затрат на производство (см. табл. 5.1).

Для установления взаимосвязей затрат по отдельным статьям с объемом производства культуральной жидкости проведен статистический анализ изменения объема ее производства и отдельных статей затрат во времени.

Построенное по эмпирическим данным уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$A(t) = 6857 + 136t;$$

$$R^2 = 0,61; \sigma_{\text{ост}} = 832,$$

где $A(t)$ — суммарный объем производства КЖ в месяце t , млрд ед. активности; t — номер месяца.

Как видно из приведенного уравнения, за анализируемый период имел место существенный рост объемов производства со средним темпом 136 млрд ед. активности в месяц.

Характеристики соответствующих линейных уравнений регрессии по отдельным статьям затрат представлены в табл. 5.2. Все статьи затрат по их зависимости от времени можно подразделить на три группы.

Первую группу составляют затраты, которые несмотря на рост объемов производства во времени не меняются, т. е. зависимость от времени для которых статистически незначима. К ним относятся затраты на эксплуатацию оборудования, воду, вспомогательные материалы, цеховые и транспортные расходы. Для этих статей затрат условно-постоянные расходы составляют 100 %.

Анализ статей затрат на производство культуральной жидкости (среднемесячные данные за 1986—1987 гг.)

Статья затрат	Абсолютные затраты, руб			Удельные затраты, руб./л/днр ед. активности			Структура затрат, %		
	Среднее значение	Средне-квadraticкое отклонение	Коэффициент вариации	Среднее значение	Средне-квadraticкое отклонение	Коэффициент вариации	Среднее значение	Средне-квadraticкое отклонение	Коэффициент вариации
Сырье и основные материалы	49 200	8950	18	4,88	0,58	12	35,72	4,95	14
Вспомогательные материалы	674	104	15	0,07	0,01	18	0,47	0,56	119
Транспортные расходы	2 492	830	33	0,25	0,09	35	1,69	0,67	39
Основная заработная плата	9 854	1616	16	1,0	0,24	24	7,19	1,14	46
Электроэнергия	791	165	21	0,08	0,02	20	0,69	0,47	67
Вода	5607	2220	40	0,56	0,21	37	3,75	1,48	40
Пар	13 157	6832	52	1,37	0,77	56	9,44	4,11	44
Воздух	18 205	3822	21	1,81	0,28	15	12,59	2,63	21
Эксплуатация оборудования	22 806	6192	27	2,34	0,79	34	16,19	3,8	24
Цеховые расходы	13 824	4447	32	1,39	0,43	31	9,64	3,0	31

Таблица 5.2

Параметры моделей динамики месячных затрат на выпуск культуральной жидкости

Статья затрат	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Стандартная ошибка регрессии	Параметры уравнения регрессии		Уровень значимости, %
				a_0	b	
Сырье и основные материалы	0,538	0,290	7722,0	34 091	643,2	4,0
Вспомогательные материалы	0,224	0,050	89,4	623	2,7	15,8
Транспортные расходы	-0,018	0	849,2	2 538	-1,9	46,8
Основная заработная плата	-0,616	0,379	1303,9	12979,2	-132,8	0,1
Электроэнергия	0,335	0,112	159,5	616,9	7,4	5,9
Вода	-0,185	0,034	2232,8	6899,1	-54,9	19,9
Пар	-0,714	0,509	4899,4	28470,1	-651,0	0
Воздух	0,431	0,185	3530,5	13035,2	219,8	2,0
Эксплуатация оборудования	-0,192	0,037	6219,1	26548,5	-159,1	19,1
Цеховые расходы	0,370	0,137	4228,9	8652,4	219,9	4,1

Ко второй группе относятся затраты, которые, несмотря на рост объемов производства, снижаются. Для них имеют место целенаправленные мероприятия по экономии. Наиболее характерно это для таких статей, как «пар» и «заработная плата». Для заработной платы это объясняется изменением порядка учета — заработная плата ремонтных рабочих исключена из данной статьи и перенесена в статью «общезаводские расходы». Кроме того, при переходе на бригадные формы организации труда пересмотрены расценки. По статье «пар» снижение вызвано проведением специальных мероприятий по его экономии. Естественно, что при учете влияния объемов производства затраты по статье «пар» можно принять условно-постоянными (100 %), а по статье «заработная плата» — для определения доли условно-постоянных расходов следует провести дополнительное исследование. В соответствии с принципами организации заработной платы рост объемов производства должен способствовать росту заработной платы.

Третью группу образуют статьи затрат, которые возрастают во времени, однако темп их роста ниже темпа роста объемов производства. К ним относятся: сырье и основные материалы, воздух, электроэнергия (рис. 5.1). По этим статьям условно-постоянные расходы составляют определенную

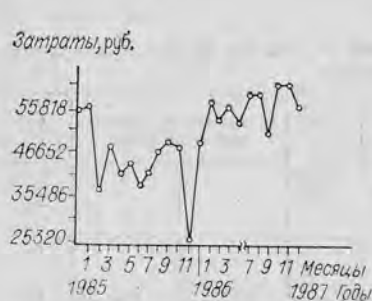


Рис. 5.1. Динамика затрат на культуральную жидкость по статье «сырье и основные материалы»



Рис. 5.2. Зависимость затрат на культуральную жидкость по статье «сырье и основные материалы» от суммарной активности.

1 — эмпирическая кривая; 2 — гипотетическая кривая

часть, которая будет установлена при втором способе анализа.

Для уточнения доли условно-постоянных расходов в статьях затрат на ферментацию использован также второй статистический прием — анализ зависимости расходов по соответствующей статье от объема производства культуральной жидкости, т. е. построение уравнений типа $z_j = f(A)$, где z_j — затраты по j -й статье, A — суммарная активность культуральной жидкости.

Соответствующие линейные модели зависимости приведены в табл. 5.3. Учитывая значительный удельный вес затрат по статье «сырье и основные материалы», а также принципиальную нелинейность зависимости затрат по этой статье от объемов производства были проанализированы и другие формы зависимости (рис. 5.2). Результаты расчетов приведены в табл. 5.4. Для описания зависимости затрат на сырье и основные материалы можно воспользоваться гиперболической функцией вида $y = A + B/x$, имеющей более высокие коэффициенты детерминации, чем у линейной регрессии и меньшую среднюю относительную ошибку прогноза.

Из анализа данных табл. 5.3 видно, что разбиение статей на группы по характеру зависимости от объемов производства в основном корреспондирует с разбиением, полученным по моделям динамики (см. табл. 5.2).

Так, к первой группе, которая включает статьи затрат, не зависящих от изменения объемов производства, относятся: эксплуатация оборудования, цеховые расходы, вода, транспортные расходы, вспомогательные материалы. По этим

Параметры моделей зависимости месячных затрат от объема выпуска культуральной жидкости

Статья затрат	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Стандартная ошибка регрессии	Уровень значимости, %	Параметры уравнения регрессии	
					a_0	b
Сырье и основные материалы	0,794	0,630	5569,8	0	-5604,4	5,4
Вспомогательные материалы	0,316	0,100	87,0	7,6	470,3	0,02
Транспортные расходы	0,090	0,008	845,9	34,2	1917,8	0,06
Основная заработная плата	-0,330	0,109	1561,2	6,2	13972,0	-0,41
Электроэнергия	0,372	0,138	157,1	4,0	316,1	4,7
Вода	0,063	0,004	2267,6	38,7	4522,4	0,11
Пар	-0,492	0,242	6089,8	0,9	39069,7	-2,58
Воздух	0,699	0,488	2798,1	0	-2401,0	2,05
Эксплуатация оборудования	-0,431	0,186	5717,7	2,0	43410,0	-2,05
Цеховые расходы	0,230	0,053	4430,3	14,5	5929,4	0,78

статьям условно-постоянные расходы составляют 100 %. Суммарные среднемесячные затраты по этим статьям составляют 45,4 тыс. руб.

Ко второй группе затрат, которые снижаются с ростом объемов производства, так же как и ранее, относятся статьи «заработная плата» и «пар». По статье «пар» условно-постоян-

Таблица 5.4

Оценка зависимости затрат сырья от объема производства культуральной жидкости

Вид зависимости	Коэффициент детерминации R^2	Параметры зависимости		Средняя относительная ошибка, %
		A	B	
$y = A + Bx$	0,740	530,4	4,93	6,2
$y = A \cdot \exp(Bx)$	0,749	17701,8	1,02	6,48
$y = A \cdot x^B$	0,774	3,5	1,03	6,03
$y = A + B/x$	0,776	100150,0	$-4,95 \cdot 10^8$	5,63
$y = 1/(A + Bx)$	0,745	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$-2,16 \cdot 10^{-9}$	6,77
$y = x/(A + Bx)$	0,799	0,2	$-1,68 \cdot 10^{-6}$	6,10
$y = A + B \log(x)$	0,761	-408434,0	49801,5	5,94

Примечание. При построении уравнений регрессии исключено одно резко выпадающее наблюдение.

ные расходы можно принять на уровне 100 %, а по «заработной плате», исходя из принципов совершенствования ее организации, примем долю условно-постоянных расходов 70 %. Таким образом, месячная сумма условно-постоянных расходов по этой группе статей составит 20 055 руб.

Последнюю группу образуют три статьи расходов: «сырье и основные материалы», «электроэнергия» и «воздух». По первой статье исходя из коэффициента детерминации доля условно-постоянных расходов составляет 35 %, по второй — 85 и по третьей — 50 %. Среднемесячная сумма условно-постоянных расходов по этой группе статей составляет 27 000 руб.

Таким образом, общая сумма среднемесячных условно-постоянных расходов по переделу «ферментация» может быть принята на уровне 92,5 тыс. руб., а переменная часть затрат — 48,2 тыс. руб. При среднемесячном объеме производства культуральной жидкости (А) 10 058 млрд ед., удельные переменные затраты составят 4,8 руб./млрд ед. активности.

Формула расчета себестоимости 1 млрд ед. активности

$$C_{\text{КЖ}}^{\Phi} = 4,8 + 92\,500/A_{\text{КЖ}} \text{ руб./млрд ед. или если}$$

перейти к готовому ХТЦ при коэффициенте выхода годного $\gamma = 0,35$, то затраты на участке ферментации, отнесенные к 1 млрд ед. готового ХТЦ, составят

$$C_{\text{ХТЦ}}^{\Phi} = 4,8/0,35 + 92\,500/A_{\text{КЖ}} \cdot 0,35 = 13,7 + 92\,500/A_{\text{ХТЦ}}.$$

Аналогичные исследования проведены по переделу «химическая очистка». В результате получены следующие модели себестоимости конечных продуктов (ХТЦ и биовиты), учитывающие влияние объемов производства.

Общая себестоимость производства 1 млрд ед. ХТЦ может быть представлена следующим образом:

$$C_{\text{ХТЦ}} = 15,04 + 177\,471/A_{\text{ХТЦ}}.$$

Если же пересчитать общую себестоимость на 1 млрд ед. культуральной жидкости, то получим следующее соотношение:

$$C_{\text{КЖ}} = 5,27 + 177\,471/A_{\text{КЖ}}.$$

Себестоимость производства биовитов может быть представлена следующим образом:

$$C_{\Sigma 6} = 12,25 + \frac{24288}{A_{\Sigma 6}}.$$

Учитывая, что выход биовитов от культуральной жидкости составляет 32 %, можно записать формулу себестоимости производства биовитов, приведенную к 1 млрд ед. активности культуральной жидкости

$$C_{\text{КЖ}}^{\Phi} = 3,92 + \frac{24288}{A_{\text{КЖ}}}.$$

§ 5. Экономико-статистическое моделирование процесса микробиологического синтеза антибиотика

Статистические подходы к моделированию процессов микробиологического синтеза. Микробиологические процессы имеют ряд особенностей, которые делают их сложным объектом для моделирования и управления:

микробиологический синтез является частью многостадийного процесса, длительность которого занимает от 60 до 65 % времени всей технологии получения препарата;

для его осуществления расходуется до 70 % сырья в натуральном выражении и около 83 % в стоимостном;

культивирование микроорганизмов осуществляется в многофазных системах, свойства которых в ходе процесса изменяются;

наличие биологического действующего начала предопределяет более высокую по сравнению с химико-технологическими процессами изменчивость конечного продукта;

сложность ферментационных сред, в том числе большое число компонентов;

относительно низкие концентрации субстрата целевого продукта и скорость биореакции.

Совершенствование периодических процессов микробиологического синтеза требует детального их исследования на количественном уровне. Регистрируемые характеристики микробиологического синтеза представляют собой последовательности значений, фиксируемые в определенные моменты времени. Каждая такая временная последовательность значений — по существу, временной ряд наблюдаемого параметра процесса. Исходя из природы микробиологического синтеза, каждый такой ряд можно рассматривать как реализацию некоторого случайного процесса.

Настоящее исследование посвящено статистическому анализу основных параметров и соотношений процесса ферментации на базе архива реализаций микробиологического синтеза, проведенного на однотипных заводских аппаратах объемом 63 и 15 м³ в условиях технологического регламента.

Характеристика исходной информации. Все параметры, характеризующие процесс ферментации, можно разделить на внутренние и внешние. К внутренним относятся: активность культуральной жидкости (содержание единицы действия ХТЦ в 1 мл, ед./мл); рН (логарифм содержания ионов водорода (H⁺) в 1 л раствора); биохимические показатели ферментационной среды (содержание крахмала и глюкозы (%); содержание фосфора (мкг/мл); содержание азота (%)). В качестве внешних выступают параметры, характеризующие режим ферментации: температура биосинтеза (°С); расход воздуха на аэрацию (м³/ч); объемы подаваемого на пеногашение жира и пропиола (л); объем аммиачной воды, подаваемой для поддержания рН при закислении (л). Кроме того, к внешним параметрам, воздействие которых проявляется на самой ранней стадии микробиологического синтеза, относятся характеристики посевного материала. Его качество во многом определяет направление дальнейшего развития биологической системы, а следовательно, и выход готового продукта.

По степени управляемости все параметры можно подразделить на управляемые, слабо управляемые и неуправляемые. Так, все перечисленные внешние параметры в той или иной мере являются управляемыми.

Из внутренних к управляемым можно отнести биохимические параметры ферментационной среды. Технически возможно их регулирование с помощью введения различных подпиток.

С позиции математического моделирования процесса биосинтеза совокупность параметров можно классифицировать по факторам производства и результирующим показателям.

Все управляемые параметры биосинтеза можно рассматривать как производственные факторы. К основным результирующим показателям можно отнести конечную активность культуральной жидкости и длительность процесса ферментации.

Заметим, что все упомянутые параметры микробиологического синтеза представляют собой последовательности значений, измеренные в различные моменты времени протекания процесса. Причем периодичность измерения различных параметров разная.

При статистическом исследовании совокупности загрузок, проведенных на однотипных аппаратах в нормальных условиях регламента, одной из проблем является обеспечение сопоставимости временных отсчетов. Дело в том, что

в периодических процессах, подверженных влиянию большого числа случайных факторов, достигнуть этого не представляется возможным. Поэтому была проведена сплайн-интерполяция временных рядов значений параметров и искусственно восстановлены все промежуточные значения переменных с 4-часовой периодичностью. Эта операция была проведена с помощью сплайнов специального вида — изометрических, сохраняющих монотонность, выпуклость, непрерывность аппроксимируемого ряда [Ворошин, 1987]. Восстановленные искусственные значения параметров могут отличаться от действительно имеющих место в данный момент времени. Однако примененная сплайновая техника позволяет подобрать гладкую кривую, наилучшим образом проходящую через заданные узловые точки.

Дальнейшее изложение будет посвящено статистическому исследованию этой информации с целью типизации процессов микробиологического синтеза по их протеканию, выявления причин различного протекания процессов, построения статистической модели для оценки состояния процесса и прогнозирования результатов культивирования.

Типизация процессов микробиологического синтеза. При типизации процессов использован нетрадиционный подход к анализу свойств временных рядов — спектральная теория (гл. 2, § 3).

Вполне понятно, что спектральный анализ следует применять к временным рядам таких параметров процесса ферментации, которые подвержены сколько-нибудь существенным колебаниям. Интегральные показатели процесса, такие, как активность культуральной жидкости, для этой цели не подходят. Наиболее чувствительны к различным изменениям состояния процесса микробиологического синтеза показатели, характеризующие скорости изменения интегральных характеристик (скорости изменения активности, рН, потребления редуцирующих веществ и др.), непосредственно во время протекания биосинтеза не измеряемых, однако получение которых принципиально возможно аналитическим путем. Например, в результате сплайн-аппроксимации интегральных характеристик одновременно возможно оценивание производной аппроксимирующего непрерывного сплайна, поскольку в теории сплайн-функций одним из обязательных условий построения сплайна является постулирование существования производных.

Нами использовалась наименее инерционная характеристика поведения процесса культивирования, отражающая влияние внешних и внутренних управляющих воздействий, —

Дисперсионный анализ параметров процесса ферментации (фаза 0÷36 ч)

Параметр	Средние значения характеристик процесса ферментации на время					
	0 ч	8 ч	16 ч	24 ч	32 ч	36 ч
1	2	3	4	5	6	7
Активность культуральной жидкости						
Общая совокупность						
Коротковолновые загрузки	0	0	0	681,1	1276,1	1600,6
Длинноволновые	0	0	0	966,3	1696,6	2079,0
F-критерий	0	0	0	11,24	11,7	10,88
Уровень значимости	0	0	0	0,0001	0,0001	0,0001
Скорость изменения активной культуральной жидкости						
Общая совокупность	0	0	0	78,38	84,81	92,01
Коротковолновые загрузки	0	0	0	64,29	82,0	81,04
Длинноволновые	0	0	0	97,13	90,0	106,06
F-критерий	0	0	0	7,34	0,49	3,47
Уровень значимости	0	0	0	0,0015	0,6152	0,0383
pH						
Общая совокупность	6,51	6,26	6,22	6,17	6,08	6,05
Коротковолновые загрузки	6,57	6,30	6,25	6,22	6,15	6,12
Длинноволновые	6,44	6,17	6,14	6,1	6,98	5,95
F-критерий	15,099	14,825	7,941	5,81	15,39	16,11
Уровень значимости	0	0	0,001	0,005	0	0
Скорость изменения pH						
Общая совокупность	-0,0737	-0,012	-0,0025	-0,0106	-0,009	-0,0057
Коротковолновые загрузки	-0,0805	-0,0136	-0,0007	-0,0087	-0,009	-0,0078
Длинноволновые	-0,0778	-0,0126	-0,0008	-0,0128	-0,0109	-0,0058
F-критерий	1,72	1,28	2,26	0,74	0,86	1,52
Уровень значимости	0,19	0,29	0,11	0,48	0,43	0,23
Содержание крахмала						
Общая совокупность	5,099	4,388	3,698	3,024	2,357	2,125
Коротковолновые загрузки	4,887	4,217	3,580	3,016	2,460	2,237
Длинноволновые	5,344	4,634	3,714	3,099	2,199	1,974

скорость изменения pH процесса ферментации. Выбор этого параметра для исследования свойств спектральной плотности определяется еще и тем обстоятельством, что, во-первых, по изменению pH можно оценивать влияние внешних управляющих воздействий на биосинтез (добавление пеногасителей, аммиачной воды и др.) и, во-вторых, pH выступает в качестве интегральной характеристики протекания процесса биосинтеза (по его значениям определяется конец процесса ферментации). Было исследовано 58 операций (загрузок) биосинтеза, для которых определялись характеристики спектра.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что временные ряды скоростей изменения pH содержат «длинноволновые» (период 20 и более временных отсчетов), что соответствует интервалу времени 0÷72 ч, «средневолновые» (период от 10 до 20) и «коротковолновые» (менее 10) составляющие (компоненты спектра).

Учитывая амплитуду составляющих, сгруппируем загрузки по периодам с преобладающей амплитудой в спектре.

Получим три типа микробиологических процессов, отличающихся характером изменения скорости pH:

1) «коротковолновые» процессы (им соответствует 29 загрузок);

2) «средневолновые» процессы (8 загрузок);

3) «длинноволновые» процессы (21 загрузка).

Проведем статистический анализ параметров микробиологического процесса, используя классификацию по характеру спектра скорости изменения pH. Воспользуемся для этого однофакторным дисперсионным анализом.

Результаты дисперсионного анализа, полученные при проверке гипотезы относительно равенства средних в классах, определяемых спектром временного ряда скорости изменения pH процесса ферментации представлены в табл. 5.5, 5.6. В них выделены две фазы производственного процесса: а) 0÷36 ч и б) 40÷72 ч. На первой фазе происходит в основном спонтанное (без вмешательства извне) развитие биосинтеза. Для второй фазы характерно активное внешнее воздействие на процесс (управляемый микробиологический синтез).

Анализ параметров на неуправляемой фазе (см. табл. 5.5) позволяет отметить следующее.

Наблюдается строгое упорядочение загрузок по типам в те периоды, когда имеется значимое отличие в средних значениях параметров. Например, «длинноволновые» загрузки имеют наибольшее среднее значение активности,

Окончание табл. 5.5

1	2	3	4	5	6	7
<i>F</i> -критерий	7,75	6,13	2,86	0,63	3,66	4,03
Уровень значимости	0,001	0,004	0,07	0,54	0,03	0,02
Скорость изменения содержания крахмала						
Общая совокупность	-0,0902	-0,0877	-0,0851	-0,0821	-0,0691	-0,0491
Коротковолновые загрузки	-0,0857	-0,0818	-0,0778	-0,0589	-0,0672	-0,0463
Длинноволновые	-0,0879	-0,0894	-0,0906	-0,1185	-0,0744	-0,0457
<i>F</i> -критерий	1,42	1,78	2,8	9,24	0,19	0,85
Уровень значимости	0,25	0,18	0,07	0,001	0,33	0,43
Содержание глюкозы						
Общая совокупность	0,981	0,982	0,983	0,97	0,905	0,864
Коротковолновые загрузки	0,593	0,735	0,878	0,990	0,957	0,916
Длинноволновые	1,409	1,260	1,110	0,961	0,847	0,782
<i>F</i> -критерий	9,09	8,95	5,81	0,36	1,81	2,82
Уровень значимости	0,001	0,001	0,005	0,70	0,17	0,07
Скорость изменения содержания глюкозы						
Общая совокупность	0,0001	0,0001	0,0001	-0,0041	-0,0091	-0,0128
Коротковолновые загрузки	0,0178	0,0178	0,0178	0,0072	-0,0111	-0,0092
Длинноволновые	-0,0187	-0,0187	-0,0187	-0,0167	-0,0106	-0,0225
<i>F</i> -критерий	8,14	8,14	8,14	9,87	0,5	2,9
Уровень значимости	0,001	0,001	0,001	0	0,61	0,06

а «коротковолновые» — наименьшее. Аналогичная картина наблюдается и с таким параметром, как скорость изменения активности культуральной жидкости. Вообще для неуправляемой фазы характерен в среднем более высокий темп прироста активности для загрузок, относящихся к «длинноволновому» типу.

В «длинноволновом» типе характерно также более низкое начальное значение рН среды (6,44 против 6,57 для «коротковолнового» типа). Такое различие сохраняется на протяжении всего периода спонтанного развития. Что касается скорости изменения рН, то на этом интервале сколько-нибудь значимого различия в величинах средних скоростей не наблюдается.

Таблица 5.6

Дисперсионный анализ параметров процесса ферментации (фаза 40 ÷ ÷ 72 ч)

Параметр	Средние значения характеристик процесса ферментации на время				
	40 ч	48 ч	56 ч	64 ч	72 ч
1	2	3	4	5	6
Активность культуральной жидкости					
Общая совокупность	2195,6	3048,5	3842,6	4531,8	5157,4
Коротковолновые загрузки	1932,1	2638,8	3417,5	4176,0	4749,3
Длинноволновые	2542,7	3568,3	4364,0	5012,3	5661,2
<i>F</i> -критерий	12,61	20,18	17,89	9,35	15,35
Уровень значимости	0	0	0	0	0
Скорость изменения культуральной жидкости					
Общая совокупность	103,52	103,44	89,36	81,06	78,33
Коротковолновые загрузки	86,05	87,44	100,02	82,6	76,37
Длинноволновые	4,27	122,83	77,35	79,02	75,05
<i>F</i> -критерий	13,74	4,41	1,25	0,03	0,23
Уровень значимости	0	0,02	0,29	0,97	0,80
рН					
Общая совокупность	6,03	5,99	5,92	5,95	6,4
Коротковолновые загрузки	6,09	6,05	6,0	5,96	5,96
Длинноволновые	5,92	5,87	5,80	5,98	6,47
<i>F</i> -критерий	14,33	20,09	18,69	1,09	15,1
Уровень значимости	0	0	0	0,34	0
Скорость изменения рН					
Общая совокупность	-0,0047	-0,0072	-0,0055	0,0130	0,0346
Коротковолновые загрузки	-0,0051	-0,0054	-0,0061	-0,0031	0,0129
Длинноволновые	-0,0051	-0,0086	-0,0023	0,0423	-0,0761
<i>F</i> -критерий	0,18	0,33	0,84	15,72	25,8
Уровень значимости	0,83	0,72	0,44	0	0
Содержание крахмала					
Общая совокупность	1,952	1,642	1,347	1,107	0,886
Коротковолновые загрузки	2,086	1,818	1,524	1,256	1,007

1	2	3	4	5	6
Длинноволновые <i>F</i> -критерий	1,796 6,86	1,439 11,6	1,081 12,65	0,860 9,60	0,695 7,55
Уровень значимости	0	0	0	0	0,001
Скорость изменения содержания крахмала					
Общая совокупность	-0,0387	-0,0406	-0,0342	-0,0271	-0,0257
Коротковолновые загрузки	-0,0331	-0,0389	-0,0373	-0,0301	-0,0280
Длинноволновые <i>F</i> -критерий	-0,0471	-0,0486	-0,0442	-0,0240	-0,0185
Уровень значимости	0,65	1,24	0,76	0,31	1,22
Содержание глюкозы	0,5265	0,2967	0,4708	0,7371	0,3028
Общая совокупность	0,802	0,626	0,470	0,317	0,191
Коротковолновые загрузки	0,880	0,739	0,573	0,404	0,264
Длинноволновые <i>F</i> -критерий	0,677	0,482	0,325	0,186	0,084
Уровень значимости	8,29	11,37	12,68	11,79	8,76
Скорость изменения содержания глюкозы	0,001	0	0	0	0
Общая совокупность	-0,0192	-0,0207	-0,0185	-0,0178	-0,0133
Коротковолновые загрузки	-0,0120	-0,0201	-0,0222	-0,0178	-0,0163
Длинноволновые <i>F</i> -критерий	-0,0280	-0,0212	-0,0175	-0,0169	-0,0391
Уровень значимости	3,38	0,09	4,34	0,18	1,8
	0,04	0,91	0,02	0,84	0,18

Следует отметить и более высокое среднее начальное содержание крахмала и глюкозы в «длинноволновом» процессе (крахмал: 5,34 против 4,88 в «коротковолновом», глюкоза: 1,409 против 0,593). Это различие сохраняется до 16 час. Затем происходит значимое изменение в скорости потребления культурой крахмала и глюкозы, начиная с 32-го часа среднее содержание в питательной среде крахмала и глюкозы резко уменьшается в классе «длинноволновых» загрузок.

Что касается управляемой фазы биосинтеза (см. табл. 5.6), то результаты здесь следующие.

По-прежнему загрузки «длинноволнового» типа отличаются существенно более высокой средней накопленной активностью культуральной жидкости, причем средние скорости ее набора существенно различаются до 48-го часа, а далее они уравниваются.

Аналогично предыдущей фазе поведение параметра рН. В «коротковолновом» типе среда более щелочная на протяжении всей фазы.

Очень существенно отличие в скорости изменения рН процесса. Начиная с 64 ч плавного закисления у «длинноволновых» загрузок присходит постепенное повышение значения рН, а скорость меняет знак на положительный. В классе «коротковолновых» загрузок закисление идет до 72-го часа, правда, скорость его уменьшается.

Достигнутое на предыдущей фазе различие в среднем содержании крахмала и глюкозы в классах «коротковолновых» и «длинноволновых» загрузок сохраняется при несущественности различия в средних скоростях их изменения.

Проводя анализ различия параметров на стадиях процесса ферментации, нельзя не отметить и тот факт, что «длинноволновый» тип характеризуется и меньшей средней длительностью микробиологического синтеза (табл. 5.7). Это отличие существенно, и в среднем составляют примерно 12 ч (значимость различия по *F*-критерию весьма существенна: $F = 18,54$; $\alpha = 0,00$).

«Длинноволновые» процессы являются более производительными, поскольку позволяют увеличить оборачиваемость аппаратов и за счет этого произвести дополнительную продукцию.

В чем же кроется причина столь различного характера протекания биосинтеза?

Таблица 5.7

Дисперсионный анализ длительности процесса ферментации

Тип процесса	Время ферментации, ч	
	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
«Длинноволновый»	73,23	5,49
«Средневолновый»	85,06	6,94
«Коротковолновый»	85,81	8,48

Дисперсионный анализ параметров посевной стадии

Тип процесса ферментации	Среднее время роста в маточной колбе	Среднее время роста посевного материала	Среднее время захлаживания посевного материала	Среднее значение рН начала I генерации	Среднее значение рН конца I генерации
«Средневолновый»	27,25	38,88	8,750	6,481	5,875
«Коротковолновый»	27,25	38,86	8,224	5,357	5,959
«Длинноволновый»	27,50	34,03	3,625	6,415	5,915
F-критерий	0,035	3,868	4,168	3,705	0,861
Уровень значимости	0,966	0,027	0,021	0,031	0,429

Ответ на этот вопрос можно попытаться получить, сформулировав определенные гипотезы и имея в распоряжении статистический материал для их проверки.

В рассматриваемом исследовании было проверено, влияют ли параметры процесса подготовки посевного материала на процесс ферментации и управляющие воздействия на активной фазе биосинтеза — на конечную активность продукта.

Исследование влияния качества посевного материала на повышение эффективности процесса биосинтеза хлортетрациклина. Процесс биосинтеза во многом зависит от качества и количества посевного материала, который получают путем многоступенчатого пересева.

Интенсификация процесса получения посевного материала предусматривает управляемое его получение в необходимых количествах. При этом должен решаться целый ряд вопросов технологического характера в целях повышения продуктивности культуры, производительности труда и аппаратуры, автоматизации процессов и снижения себестоимости готового продукта.

К сожалению, этот важный вопрос практически не рассматривается в публикациях, посвященных вопросам оптимизации процессов микробиологического синтеза. На наш взгляд значительный интерес представляет исследование влияния качества посевного материала на выход готового продукта (в данном случае культуральной жидкости хлортетрациклина).

Каждая операция получения посевного материала состоит из выращивания маточного посевного материала — в колбах, посевного материала I генерации — в посевных аппаратах емкостью 1,5 м³ и посевного материала II генерации — в посевных аппаратах емкостью 10 м³.

Операция получения посевного материала характеризуется такими параметрами, как:

- 1) время роста маточного посевного материала, ч;
- 2) время роста материала I генерации, ч;
- 3) время захлаживания посевного материала I генерации, ч;
- 4) время роста посевного материала II генерации, ч;
- 5) время захлаживания посевного материала II генерации, ч;
- 6) рН начальное посевного материала I генерации;
- 7) рН конечное посевного материала I генерации;
- 8) рН начальное посевного материала II генерации;
- 9) рН конечное посевного материала II генерации;

10) исходное содержание крахмала в посевном материале II генерации;

11) исходное содержание фосфора в посевном материале II генерации;

12) исходное содержание азота в посевном материале II генерации.

Используя однофакторный дисперсионный анализ, оценим параметры посевной стадии по выделенным типам протекания биосинтеза в рабочих ферментаторах («длинноволновые», «средневолновые» и «коротковолновые» загрузки).

Результаты дисперсионного анализа параметров посевной стадии представлены в табл. 5.8.

Обращает на себя внимание следующее. Посевной материал по типам процесса биосинтеза имеет существенно различное время роста на I генерации («длинноволновые» загрузки примерно 34 ч, а «коротковолновые» — 39). Причем это различие объясняется исключительно фактором захлаживания (вынужденная производственная мера, вызываемая несовпадением времени созревания культуры на посевной стадии и готовностью рабочих ферментаторов в цехе). Посевной материал с большим средним временем захлаживания соответствует загрузкам, которые в дальнейшем формируют «коротковолновый» тип процесса биосинтеза.

Отсюда, конечно, прямо не вытекает, что все загрузки, сформированные из незахоложенного посевного материала обязательно дают «длинноволновый», экономически более продуктивный тип биосинтеза. И наоборот, что все загрузки, посеянные захлаженным на I генерации посевным материалом, дадут «коротковолновый» тип биосинтеза. Это видно и по распределению захлаженного и незахоложенного посевного материала внутри рассматриваемых типов. Так, в классе «длинноволновых» операций (20 загрузок) распреде-

ление по захлаженности посевного материала I генерации следующее:

Захлаженность, ч	Число загрузок	%
0	11	55
Менее 10	7	35
Более 10	2	10

В классе «коротковолновых» операций (29 загрузок) распределение по захлаженности следующее:

Захлаженность, ч	Число загрузок	%
0	8	27,5
Менее 10	8	27,5
Более 10	13	45,0

Учитывая, что микробиологический синтез — сложный вероятностный процесс, подверженный влиянию различных факторов известной и неизвестной природы, полученный результат может иметь следующее толкование.

Фактор захлаженности посевного материала с ненулевой вероятностью оказывает влияние на дальнейший процесс микробиологического синтеза. Причем длительно захлаженный посевной материал в большинстве своем соответствует операциям, развивающимся технологически и экономически менее продуктивно.

Это обстоятельство можно достаточно корректно подтвердить статистически, используя построение таблиц сопряженности и проверяя статистическую гипотезу о независимости.

Была проведена проверка гипотезы о независимости типа процесса биосинтеза («коротковолновый», «средневолновый», «длинноволновый») от времени захлаживания посевного материала I генерации. Исследуемые ситуации различались тем, что в одном случае признак «время захлаживания» (ч) разбивается на 2 градации (0 и больше 0), а во втором — на три (0, от 0 до 10, более 10).

В обоих рассмотренных случаях $\chi^2 > \chi_{\alpha}^2(v)$, следовательно, гипотезы о независимости следует отклонить. Таким образом, с высокой степенью надежности можно констатировать наличие взаимосвязи между захлаженностью посевного материала I генерации и дальнейшим протеканием процесса микробиологического синтеза.

Моделирование технологико-экономических параметров процесса ферментации. В процессе получения антибиотиков измеряется большое число технологических и биохимических параметров, характеризующих его протекание. Они могут

Содержание азота, %

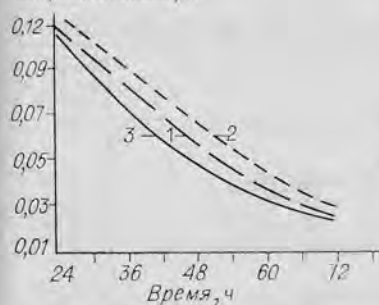


Рис. 5.3. Изменение содержания азота по типам биосинтеза. 1 — совокупность загрузок; 2 — «коротковолновый» тип; 3 — «длинноволновый» тип

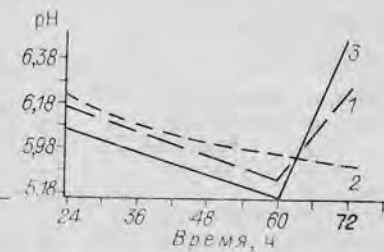


Рис. 5.4. Изменение pH по типам биосинтеза. Условные обозначения см. рис. 5.3

использоваться для управления процессом, прогнозирования и контроля его протекания. В чем состоит важность оценивания параметров, отражающих состояние процесса микробиологического синтеза?

Предварительный прогноз эффективности процесса позволяет не затрачивать время на проведение ферментации до конца цикла, а прекратить ее, загрузить аппарат заново и вести процесс с более высокой производительностью. Сигнал о неблагоприятной технологической ситуации может быть использован для привлечения внимания к диагностике причин нарушений в ходе процесса и, возможно, их устранения. Прогнозирование хода ферментации (времени ее окончания и конечной активности культуральной жидкости) позволяет построить рациональные календарные графики работы ферментов и тем самым снизить как вероятность захлаживания посевного материала, так и пиковые нагрузки на участке химической очистки.

Поскольку протекание процесса ферментации происходит неодинаково для различных типов биосинтеза, исследовались как общая совокупность загрузок, так и загрузки, относящиеся к «длинноволновому» и «коротковолновому» типам биосинтеза.

В табл. 5.9 и на рис. 5.3 и 5.4 приведены изменения некоторых основных параметров процесса ферментации.

Из таблицы и графиков видно, что основная часть параметров, за исключением содержания глюкозы, в процессе ферментации изменяется нелинейно. Причем «длинноволновый» тип характеризуется более интенсивным падением со-

Модели изменения основных

Моделируемый параметр	Вид модели	Коэффициент детерминации
Совокупность загрузок		
Содержание крахмала	$y = A * \exp(B * t)$	0,999
» глюкозы	$y = A + (B * t)$	0,990
» азота	$y = A + B * \log(t)$	0,993
pH	Кусочно-линейный сплайн	0,944
«Коротковолновые» загрузки		
Содержание крахмала	$y = A * \exp(B * x)$	0,996
» глюкозы	$y = A + (B * x)$	0,971
» азота	$y = A + (B * x)$	0,984
pH	$y = A + B * \log(x)$	0,988
«Длинноволновые» загрузки		
Содержание крахмала	$y = A * \exp(B * x)$	0,997
» глюкозы	$y = A + (B * x)$	0,993
» азота	$y = A * \exp(B * x)$	0,991
pH	Кусочно-линейный сплайн	0,974

держания основных компонентов питательной среды в процессе биосинтеза, что соответствует и более интенсивному росту культуры.

Особо следует отметить изменение pH в процессе биосинтеза. «Коротковолновый» тип процесса характеризуется плавным, монотонным закислением питательной среды, в то время как для «длинноволнового» типа биосинтеза вначале наблюдается закисление, переходящее после 60 ч в монотонное защелачивание.

С целью выявления влияния технико-технологических параметров на объем производства культуральной жидкости, измеряемый в единицах активности массы, были построены статистические модели зависимости активности от таких параметров процесса, как pH, содержание глюкозы, крахмала и азота питательной среды, а также времени ферментации (табл. 5.10). Анализ построенных зависимостей позволяет отметить следующее. Существенно больший прирост активности в единицу времени (101,4 против 87,7 ед.) характерен для «длинноволнового» типа биосинтеза. Исходя из различного поведения параметра pH в «длинноволновом» и «коротковолновом» типах, его влияние на рост активности выражается не только различием коэффициентов соответствующих моделей, но и знаком их коэффициентов. Столь же значимое различие наблюдается и для такого технологического параметра, как содержание азота в питательной среде.

параметров биосинтеза во времени

	Коэффициенты модели			Средняя относительная ошибка прогноза, %
	A	B	C	
	5,29562	-2,4764E-02	—	1,16
	1,41499	-0,016693	—	4,67
	0,407017	-9,04088E-02	—	6,35
	6,38384	-8,97937E-03	4,34611E-02	4,13
	5,07729	-2,19184E-02	—	1,70
	1,4815	-1,64206E-02	—	5,45
	0,170095	-2,08049E-03	—	6,32
	7,03845	-0,25732	—	0,08
	6,1095	-3,056E-02	—	1,91
	1,44502	-1,95386E-02	—	4,28
	0,284697	-0,037684	—	4,51
	6,24979	-7,7906E-03	6,28334E-02	2,22

Построенные модели позволяют исходя из прогноза типа биосинтеза рассчитывать средние значения активности культуральной жидкости в одной операции ферментации, которые затем можно использовать для расчета объема производства продукции, а также затрат на ее получение.

Используя зависимость активности от времени ферментации, можно определить наиболее рациональную длительность процесса биосинтеза с позиции эффективности производства на заводе в целом.

Построенные модели взаимосвязи активности культуральной жидкости от технологических параметров ферментации позволяют представить процесс лишь в «среднем», характерном для того или иного типа биосинтеза. Модели этого вида целесообразно использовать в имитационных расчетах для оценки влияния типа биосинтеза на эффективность производства в целом.

Авторегрессионные модели индивидуального прогнозирования результатов биосинтеза. Для более качественного предсказания результатов биосинтеза с использованием информации об индивидуальных состояниях гораздо эффективнее применение авторегрессионных моделей. Эти модели ориентированы на существование взаимосвязи текущего состояния с состояниями в некоторые предшествующие моменты времени.

Исследование корреляционных связей внутри выделенных типов процессов биосинтеза выявило достаточно зна-

Модели активности культуральной

Тип процессов	Моделируемый показатель	Критерий Фишера	Коэффициент детерминации R^2	Остаточное среднеквадратическое отклонение $\sigma_{ост}$
Совокупность загрузок	Активность	5124,0	0,998	84,43
	»	4343,0	0,997	103,52
Коротковолновые загрузки	Активность	6468,58	0,999	29,44
	»	7423,0	0,998	54,92
Длинноволновые загрузки	Активность	12879,0	0,999	24,18
	»	1999,0	0,995	122,41

Примечание. В числителе представлены значения коэффициентов чимые автокорреляционные зависимости таких важных параметров состояния, как активность культуральной жидкости и рН среды. Причем следует отметить, что эти зависимости проявляются достаточно значимо в течение одной, двух смен (т. е. 8—16 ч). При достаточно продолжительном периоде автокорреляционная зависимость резко уменьшается. Это позволило выдвинуть предположение, что процесс биосинтеза обладает сравнительно слабой инерционностью: он подвержен частым сменам состояния. Все это существенно усложняет прогноз его протекания.

В табл. 5.11 приведены авторегрессионные модели для прогнозирования параметров состояния процесса биосинтеза в течение одной операции ферментации.

Из построенных моделей лучшими по качеству являются модели активности культуральной жидкости, что, по-видимому, объясняется большей инерционностью этого показателя. Поскольку накопленная активность и длительность операции ферментации тесно коррелированы, то аналогичные модели могут быть построены и для прогнозирования времени окончания биосинтеза.

Моделирование показателя рН среды с помощью линейных авторегрессионных зависимостей менее удачно. Этот параметр менее инерционен (особенно для «длинноволнового»

жидкости по типам биосинтеза

Свободный член a_0	Коэффициент регрессии a_i/σ_{a_i}				
	x_1 рН	x_2 крахмал	x_3 глюкоза	x_4 азот	x_5 время ферментации
3518,22	$\frac{565,75}{134,3}$	$\frac{-1441,3}{531,4}$	$\frac{-4275,8}{755,7}$	$\frac{19437,42}{16503,9}$	$\frac{92,497}{1,4}$
-1409,38	—	—	—	—	
13960,17	$\frac{1251,56}{912,52}$	$\frac{-964,63}{190,88}$	$\frac{-3289,96}{216,02}$	$\frac{5658,4}{2867,54}$	$\frac{87,69}{1,02}$
-1517,35	—	—	—	—	
3442,97	$\frac{434,22}{96,15}$	$\frac{106,12}{123,92}$	$\frac{-3565,96}{285,15}$	$\frac{-18201,12}{5256,2}$	$\frac{101,43}{2,27}$
-1458,86	—	—	—	—	

регрессии, а в знаменателе — их среднеквадратические отклонения.

типа биосинтеза) и для его качественного моделирования, по всей видимости, следует воспользоваться адаптационным подходом, который позволяет оперативно изменять структуру модели по мере поступления новой информации о моделируемом параметре. Заметим, что адаптация необходима также при разработке процедуры, позволяющей предсказывать и тип процесса ферментации на основании информации о реализованных состояниях.

Точность текущего прогноза по авторегрессионной модели может быть также существенно повышена за счет введения в авторегрессионные модели трендовой составляющей. Она позволяет учесть накопленную тенденцию и существенно повысить точность при прогнозировании конечных состояний процесса, что особенно важно для оперативного планирования и управления.

§ 6. Экономический анализ результатов исследования

Выполненный анализ экономики производства антибиотика позволил установить, что основным путем повышения экономической эффективности работы предприятия является увеличение объемов выпуска и переработки культу-

Модели прогнозирования основных параметров ферментации

Параметр состояния на время t	Коротковоловновые загрузки				Длинноволовновые загрузки			
	Фаза 0 ÷ 36 ч		Фаза 36 ÷ 72 ч		Фаза 0 ÷ 36 ч		Фаза 36 ÷ 72 ч	
	Свободный член	Коэффициент регрессии на время ($t-8$) при факторах	Актив-ность культ. жидкости	рН	Свободный член	Коэффициент регрессии на время ($t-8$) при факторах	Актив-ность культ. жидкости	рН
Активность культуральной жидкости	592,0	1,176	4,100	744,0	1,00	4,100	0,64	0,67
	2,86	0,49	2,40	1,51	0,74	0,58	0,74	0,67

Т а б л и ц а 5.12

Изменение удельных затрат на производство продукции по переделам в зависимости от изменения объемов производства

Рост объема производства относительно среднего, %	Удельные затраты по переделам и продуктам, руб./млрд ед. активности		
	Ферментация	Химическая очистка	
		Культурная жидкость	ХТЦ
0	14,0	25,0	19,8
1	13,9	24,7	19,7
5	13,6	23,9	19,4
10	13,2	22,8	19,1
15	12,8	21,9	18,8
20	12,5	21,0	18,5
25	12,2	20,2	18,3

ральной жидкости. При этом главный способ увеличения объема выпуска культуральной жидкости — повышение ее качества, выражающееся в росте средней активности единицы массы. Увеличение объемов ее производства обеспечивает почти пропорциональный рост производства ХТЦ и биовитов, а следовательно, и общей массы прибыли. Помимо этого достигается существенное снижение удельных затрат сырья и основных материалов (рост выхода при стабильных загрузках ферментеров) и условно-постоянных расходов, составляющих по переделу «ферментация» 65 % общих затрат, а по переделу «кристаллизация» — порядка 95 %.

Из полученных зависимостей (§ 4) следует, что рост объемов производства культуральной жидкости обеспечивает снижение затрат на производство (табл. 5.12, 5.13).

Нетрудно видеть, что повышение объема выпуска и переработки культуральной жидкости даже на 1 % обеспечивает абсолютную экономию на затратах порядка 30 тыс. руб. в год, а увеличение объемов производства на 5 % (что вполне достижимо при современном состоянии производства на заводе) дает более 100 тыс. руб. экономии.

Что касается прибыли, то за счет одновременного роста объемов производства и снижения затрат она возрастает следующим образом (табл. 5.14).

Из приведенных в табл. 5.14 расчетов видно, что увеличение объема производства на 1 % обеспечивает рост

Таблица 5.13

Экономия затрат при различных вариантах роста объемов производства

Рост объема производства относительно среднего, %	Ферментация			Химическая очистка						Суммарная экономия затрат, тыс. руб.
	Культурная жидкость			ХТЦ			Биовиты			
	Экономия удельных затрат, руб.	Годовой объем производства, млрд ед.	Годовая экономия затрат, тыс. руб.	Экономия удельных затрат, руб.	Годовой объем производства, млрд ед.	Годовая экономия затрат, тыс. руб.	Экономия удельных затрат, руб.	Годовой объем производства, млрд ед.	Годовая экономия затрат, тыс. руб.	
1	0,1	121 907	12,2	0,3	43 571	13,1	0,1	39 188	3,9	29,2
5	0,4	126 735	50,7	1,1	45 297	49,8	0,4	40 740	16,3	116,8
10	0,8	132 770	106,2	2,2	47 454	104,4	0,7	42 680	29,9	240,5
15	1,2	138 805	166,6	3,1	49 611	153,8	1,0	44 620	44,6	365
20	1,5	144 840	217,3	4,0	51 768	207,1	1,3	46 560	60,5	484,9
25	1,8	150 875	271,6	4,8	53 925	258,8	1,5	48 500	72,8	603,2

прибыли примерно на 44 тыс. руб., средний прирост объемов производства на 5 % приводит к росту прибыли на 185 тыс. руб. При достижении 10 % роста объемов производства годовая прибыль возрастает почти на 380 тыс. руб.

Увеличение объема выпуска конечной продукции (с учетом роста удельной активности) и снижение затрат может быть получено за счет совершенствования технологического режима.

Таблица 5.14

Изменение размера годовой прибыли при различных вариантах роста объема производства

Рост объемов производства относительно среднего, %	ХТЦ				Биовиты				Суммарная прибыль, тыс. руб.
	Цена 1 млрд ед., руб.	Себестоимость, руб./млрд ед.	Объем выпуска, млрд ед.	Прибыль, тыс. руб.	Цена 1 млрд ед., руб.	Себестоимость, руб./млрд ед.	Объем выпуска, млрд ед.	Прибыль, тыс. руб.	
0	85	63,9	43 140	910,3	32	19,8	38 800	473,4	1383,5
1	85	63,3	43 571	945,5	32	19,7	39 188	482,0	1427,7
5	85	61,7	45 297	1055,4	32	19,4	40 740	513,3	1568,7
10	85	59,5	47 454	1210,1	32	19,1	42 680	550,6	1760,7
15	85	57,5	49 611	1364,3	32	18,8	44 620	589,0	1953,3
20	85	55,7	51 768	1516,8	32	18,5	46 560	628,6	2145,4
25	85	54,1	53 925	1666,3	32	18,3	48 500	664,5	2330,8

Примечание. Прибыль рассчитана из условия постоянства коэффициента выхода годного ХТЦ и биовитов из культуральной жидкости.

Таблица 5.15

Основные показатели биосинтеза по типам операций

Тип операций биосинтеза	Доля типа процесса, %	Основные показатели биосинтеза	
		Средняя удельная активность операции, млн ед./т	Среднее время ферментации, ч
«Коротковолновый»	50,0	5834	85,8
«Средневолновый»	14,0	6312	85,1
«Длинноволновый»	36,0	5764	73,2

Увеличение доли «длинноволнового» и «средневолнового» типа операций ферментации. По материалам, полученным при исследовании были определены доли отдельных типов биосинтеза и средние значения основных показателей для ферментеров емкостью 63 м³ (табл. 5.15).

Увеличение доли более производительного типа биосинтеза в основном может быть достигнуто путем рациональной организации процесса подготовки посевного материала и согласования его с графиком работы парка ферментеров. Если за счет этих мероприятий будет обеспечено такое согласование стадий подготовки посевного материала и ферментации, что длительность захлаживания не будет превышать 10 ч, то доля менее производительного типа процесса («коротковолнового») уменьшится с 50 до 41 %.

При изменении распределения операций биосинтеза по типам средняя продолжительность операций ферментации уменьшится на 2 %. При этом годовое производство культуральной жидкости также возрастет примерно на 2 %. Это обеспечит годовую экономию затрат в размере примерно 55 тыс. руб. и рост прибыли порядка 84 тыс. руб.

Одним из путей согласования операций подготовки посевного материала и ферментации, а следовательно, и путей сокращения доли захлаженных загрузок является разработка и использование оперативного прогнозирования длительности процесса ферментации на основе адапционных моделей авторегрессии. Модели позволяют прогнозировать время окончания каждой конкретной операции биосинтеза последовательно по ходу ее протекания, корректируя прогноз по мере реализации части процесса. Модель может работать в режиме реального времени и обеспечить выдачу оперативных прогнозов, используя которые можно планиро-

вать работу участка подготовки посевного материала и цеха химической очистки.

Выбор экономически выгодного соотношения между длительностью операций ферментации и качеством культуральной жидкости. Рост объемов производства возможен как за счет сокращения длительности операций ферментации, так и за счет повышения активности единицы массы культуральной жидкости. Однако с экономической точки зрения действие этих факторов неравнозначно. Сокращение длительности операций ферментации приводит к росту производительности и экономии только на условно-постоянных расходах. Например, сокращение длительности операции на 5 % для ферментеров емкостью 63 м³ повышает производительность на 4,5 % и соответственно общая экономия составит около 105 тыс. руб. В то же время повышение активности культуральной жидкости дает экономию не только при снижении условно-постоянных расходов, но и при уменьшении удельного расхода сырья и материалов (из одинаковых загрузок получается больший выход продукции). В этом случае все затраты по участку ферментации можно считать условно-постоянными. Увеличение активности культуральной жидкости на 5 %, с одной стороны, ведет к росту объема производства на 5 %, экономии затрат примерно на 117 тыс. руб. и снижению затрат на сырье и основные материалы еще на 19 тыс. руб. Итоговая экономия затрат в этом случае составит 136 тыс. руб. против 105 тыс. в случае снижения длительности операции. Т. е. каждый процент роста активности дает в 1,3 раза больший экономический эффект, чем такое же снижение длительности операции.

Поскольку завод располагает определенным резервом парка ферментеров, становится очевидным, что более рационален режим с удлинением времени ферментации, если при этом наблюдается рост активности (в технологически допустимых пределах длительности ферментации).

Как показали исследования процесса ферментации, на заключительной стадии биосинтеза (после 72 ч) обеспечивается прирост активности культуральной жидкости примерно на 75 млн ед./ч. Т. е. увеличение времени ферментации приводит практически к пропорциональному росту активности культуральной жидкости (за 1 ч удлинения времени ферментации рост активности составит 1,2 %). Если принять, что допустимо увеличение времени ферментации в среднем на 5 ч для операции, то получим прямую экономию на удельных расходах сырья и материалов порядка 30 тыс. руб./год.

Поддержание оптимальных технологических режимов на

управляемой стадии биосинтеза. Данное направление повышения эффективности процесса относится к потенциальным резервам производства, поскольку требует оснащения ферментеров соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой, позволяющей осуществлять активное воздействие на процесс биосинтеза. Установлено, что к наиболее важным параметрам, подлежащим управлению, относится рН питательной среды. Стабилизация скорости и направления изменения рН по оптимальной траектории обеспечивает рост производительности аппаратов. Выбор факторов управления этим параметром не возможен без проведения дополнительных специальных экспериментов по установлению влияния основных управляющих параметров (подача воздуха, скорость перемешивания, добавки реагентов и питательных растворов, состав и качество питательной среды и т. д.) на ход биосинтеза.

Совершенствование управления производственным процессом на базе использования статистических имитационных моделей и ЭВМ. Представляется, что описанное исследование может явиться базой для построения двух типов моделей, используемых в системах управления производственным процессом.

К первому типу, который может быть реализован на основании данного исследования, относится «модель-советчик» для привития стратегических решений, проигрывания возможных вариантов технологических режимов с оценкой их экономических последствий, прогнозирования хода процесса биосинтеза на различных ферментерах, планирования работы участков подготовки посевного материала и цеха химической очистки.

Назначение второго типа модели — автоматизированное управление технологическим процессом в режиме реального времени. Такая модель позволит оптимальным образом вести каждую отдельную операцию биосинтеза.

Глава 6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПОЧКЕ. ПОСТРОЕНИЕ СОГЛАСОВАННОЙ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ

§ 1. Постановка задачи

Значительная часть предприятий с непрерывным (периодическим) производственным циклом или непосредственно занимается добычей сырья для своих нужд или перера-

батывается первичное сырье. Так, в металлургии рассматриваются следующие отдельные циклы производственного процесса: промышленная разведка месторождения — добыча — обогащение — металлургия — металлообработка. Каждый из этих циклов включает ряд последовательных операций: транспортировку, подготовительные работы, основные технологические операции, отгрузку готовой продукции. Вся последовательность посвящена одной цели — выпуску готовой продукции. Это позволяет рассматривать связанные в процессе производства подразделения как технологические цепочки.

Под технологической цепочкой понимается совокупность связанных технологических переделов. Она может включать в себя как одно предприятие, так и несколько административно обособленных предприятий. В последнем случае связь осуществляется посредством передачи готового продукта одним предприятием другому, для которого этот продукт является исходным сырьем. В самом общем случае технологическую цепочку можно определить как совокупность взаимосвязанных предприятий, согласованно взаимодействующих в процессе достижения общих народнохозяйственных целей по комплексному использованию сырья и пропорционально развивающихся на основе межотраслевой комплексной технологии.

На предприятиях (группах предприятий) с непрерывным производственным циклом могут встречаться разные виды технологических цепочек: прямые и с наличием обратных связей. Здесь и далее под прямыми технологическими цепочками подразумеваются такие, в которых рассматривается последовательная передача полуфабриката от одного подразделения другому. Как прямые цепочки, так и цепочки с наличием обратных связей могут быть разветвляющимися, однолинейными, сходящимися и комбинированными (схема 6.1 а—г).

Прямые разветвляющиеся цепочки могут быть условно разбиты на три участка:

1) однолинейный прямой многоступенчатый процесс, при котором продукт, содержащий ценный компонент, последовательно проходит несколько стадий переработки;

2) передел разветвления, когда происходит разделение продукта на несколько полезных составляющих, которые в дальнейшем перерабатываются отдельно друг от друга вплоть до получения готовой продукции;

3) участок параллельных технологических производств, перерабатывающих и выпускающих отличные друг от друга

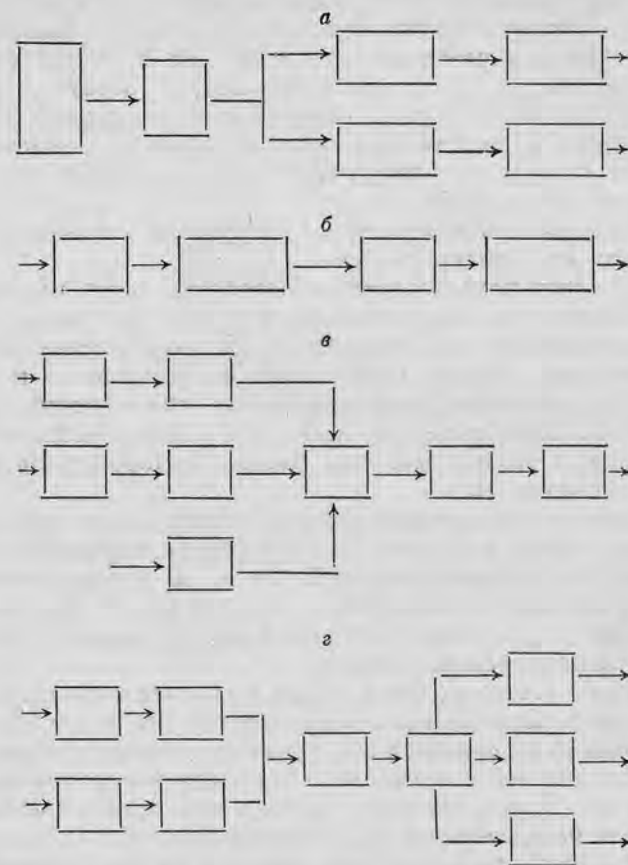


Схема 6.1. Виды технологических цепочек.
а — разветвляющаяся, б — однолинейная, в — сходящаяся, г — комбинированная

сырьем и продукцией. Особенностью этого участка является то, что он может быть в зависимости от целей исследования расчленен на несколько однолинейных прямых многоступенчатых процессов.

Однолинейные технологические цепочки характеризуются отсутствием параллельных производств, а также переделов разветвления и соединения. Они могут быть двух видов: с обязательными последовательными связями и с необязательным включением всех звеньев технологической цепочки. Прямые однолинейные процессы в практике функционирования промышленных объектов (или их совокупно-

сти) встречаются редко. В исследованиях они могут вычлениваться из более сложных цепочек (сходящихся, разветвляющихся, комбинированных) по одной из возможных схем, если на участке вычленения отсутствуют обратные связи. В этом случае продукт, поступающий на первую стадию переработки в этой технологической цепочке, считается исходным сырьем, а выходящий с ее последней стадии — конечным продуктом.

В сходящихся прямых технологических цепочках можно выделить следующие участки:

1) участок параллельных производств. Здесь параллельные производства перерабатывают однотипное сырье и выпускают одинаковую продукцию. В большинстве случаев параллельные линии территориально разобщены и относятся к различным административно обособленным предприятиям. Например, это несколько горно-обогатительных комбинатов, обрабатывающих разные месторождения одних и тех же металлов;

2) передел соединения. На этой стадии продукция параллельных линий поступает на дальнейшую переработку (например, на металлургический завод) и перерабатывается как продукция одной линии, если передел «соединения» не является конечным в технологической цепочке, то возможен однолинейный процесс.

Следует отметить, что в одном технологическом процессе могут иметь место несколько типов технологических цепочек: однолинейные с прямыми и обратными связями, сходящиеся, разветвляющиеся с прямыми, обратными и пересекающимися связями. Последние имеют место в том случае, когда отходы одной параллельной линии используются в технологическом процессе другой. Такие цепочки являются комбинированными, но в зависимости от цели исследования их можно при определенных условиях представлять как совокупность более простых. В качестве примера комбинированной цепочки приведем схему получения алюминия из нефелиновой руды (схема 6.2). На глиноземном комбинате при переработке алумосодержащего сырья можно выделить содовую, цементную и глиноземную цепочки.

Технологические переделы, входящие в цепочку по производству готовых продуктов, связаны между собой посредством «входов» и «выходов». При этом подразделения, находящиеся в начале технологической цепочки, через систему промежуточных звеньев оказывают воздействие на конечный результат производства, т. е. в процессе работы они могут производить промежуточные продукты различно-

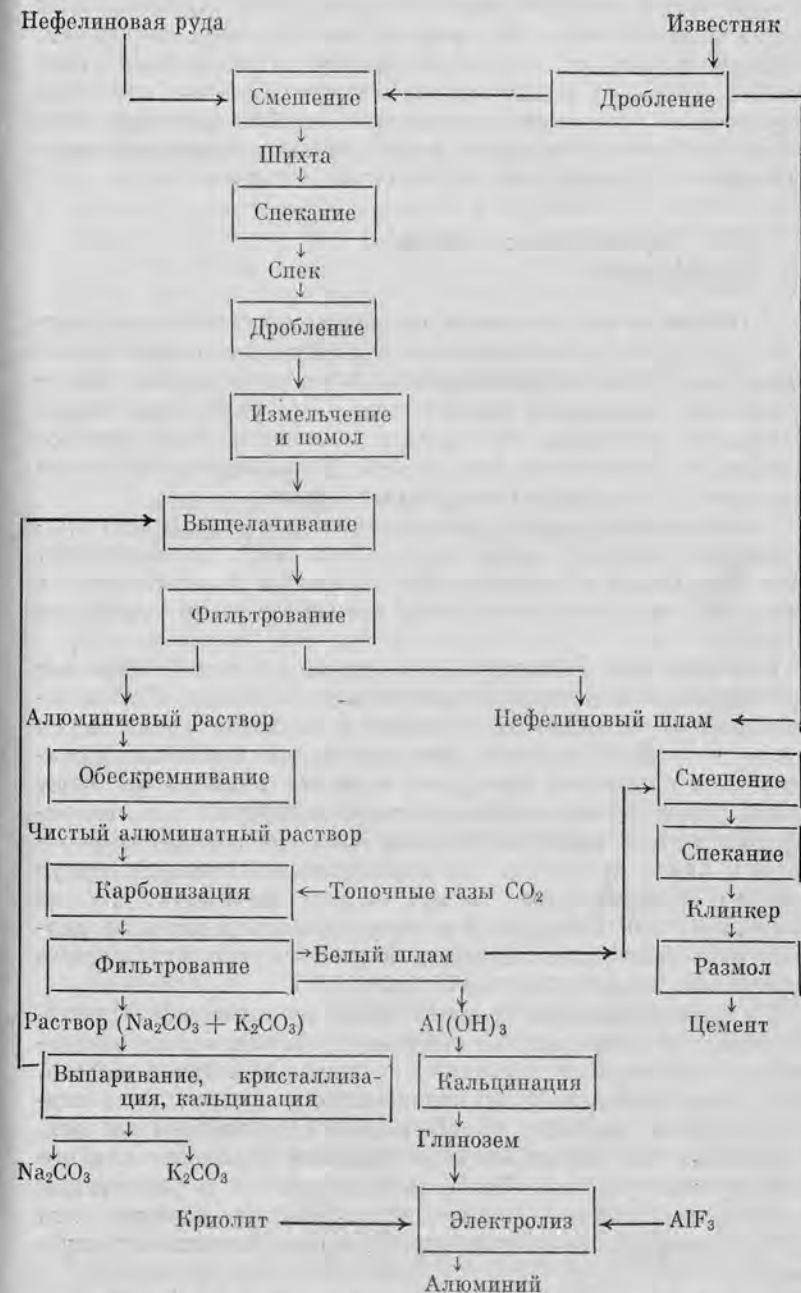


Схема 6.2. Получение алюминия из нефелиновой руды

го качества, с отклонениями по срокам и т. д., что в свою очередь, сказывается на работе последующих переделов. Поэтому возникает задача согласования интересов всех звеньев технологической цепочки для улучшения конечных результатов производства. Первым этапом решения этой задачи является построение модели функционирования промышленного объекта или нескольких объектов.

§ 2. Характеристика объекта исследования

Объектом исследования является технологически связанная система, состоящая из алюминиевого завода и глиноземного комбината. Алюминиевый завод представлен технологическим переделом «электролиз». Все остальные технологические переделы объединены в составе глиноземного комбината, конечными продуктами для которого являются глинозем, кальцинированная сода и цемент.

Глиноземное производство состоит из четырех цехов: приготовления шихты, спекания, гидрохимии, кальцинации. Цех гидрохимии объединяет три основных технологических передела: выщелачивание, обескремнивание и карбонизация.

Поступающее на переработку сырье проходит через все технологические переделы производства металла. Любое отклонение от оптимальных режимов ведения процесса на одном из технологических переделов может изменить характеристики конечного продукта, если его влияние не будет нивелировано на последующих стадиях переработки. Например, шихта при спекании должна быть правильно дозирована, так как в противном случае при выщелачивании могут возрасти безвозвратные потери окиси алюминия. То же происходит при нарушении температурного режима на данном технологическом переделе, в этом случае ухудшаются физические характеристики спека.

На выщелачивание большое влияние оказывает отношение жидкого компонента к твердому, так как в воде растворяются алюминий и кальций, а в осадке находится железо. При малой величине этого отношения кристаллизуются гидроалюминаты кальция с небольшим содержанием железа, увеличивая тем самым вредные примеси в глиноземе и его безвозвратные потери. После выщелачивания и фильтрации алюмоиатный раствор поступает на обескремнивание, ход которого зависит от температуры и продолжительности процесса.

На последующей стадии технологического процесса — карбонизации — также большое влияние оказывают температурные условия (температуру поддерживают на уровне 80 °С). После фильтрации гидрат окиси алюминия поступает на кальцинацию. Полученный глинозем после охлаждения направляют на алюминиевый завод в электролизный цех, где получают готовый металл. При моделировании производства глинозема и алюминия появляется необходимость увязки в единое целое различных технологически связанных подсистем: цехов, переделов, участков, крупных агрегатов. Это, в свою очередь, ставит задачу выявления условий и результатов деятельности отдельных подразделений и уровня использования имеющихся у них ресурсов, эффективности их деятельности с позиций конечных для системы результатов.

§ 3. Построение экономико-статистических моделей производства глинозема и алюминия

Отбор существенных факторов. Исходная информация представляет собой помесичные сведения за пять лет об экономических результатах деятельности предприятий, технологических параметрах, регулируемых условиях работы (к последним относятся факторы, регулируемые на уровне предприятия). Задача состояла в том, чтобы выбрать все факторы, которые так или иначе могут повлиять на значения результативных показателей. Выбор факторов и их измерителей не имеет формального алгоритмического характера и зависит от изученности моделируемого объекта, опыта предыдущих исследований.

Для исследования выбирались те факторы, которые имеют количественное выражение. Из-за невозможности адекватной оценки такие факторы, как уровень организации производства и качество управления, не рассматривались. Анализировалась совокупность данных, описывающих работу технологической цепочки. Их выбор полностью зависел от условий протекания технологического процесса, организации и планирования производства. Часть информации нельзя было получить в пригодном для использования виде. Так, все среднемесячные объемные показатели были пересчитаны на среднесуточные с целью уменьшения ошибки в исследованиях, неизбежно возникающей при анализе объемных показателей, соответствующих разным временным периодам, так как число дней в месяце колеблется от 28 до 31.

В начале исследования факторное пространство системы в целом состояло из 140 показателей: 105 — для глиноземного комбината и 35 — для металлургического завода. Наиболее значимые показатели отбирались по каждому технологическому переделу отдельно. При этом прежде всего исключалась мультиколлинеарность, вызывающая смещение статистических оценок параметров модели, для чего проводилась группировка показателей.

Для дальнейшего рассмотрения отбирался, как правило, один показатель из каждой группы. Следует отметить, что при определении существенных факторов для каждого передела учитывались особенности функционирования системы в целом. Исходя из этого требования существенные показатели отбирались согласованно с предыдущими и последующими технологическими переделами. Таким образом, были отобраны факторы для дальнейшего анализа и интерпретации результатов. При этом исключались дублирующие и функционально связанные показатели. Например, парный коэффициент корреляции факторов — выход алюминия по току и выход алюминия по электроэнергии — очень высок (0,893). Целесообразно было оставить один из этих показателей.

По каждому переделу оставлялись те факторы, парный коэффициент корреляции между которыми меньше 0,6. Используя этот метод, удалось уменьшить факторное пространство системы со 140 до 78 показателей (19 для металлургического завода и 59 для глиноземного комбината).

После уменьшения числа исследуемых показателей создается возможность построения полных регрессионных моделей, включающих максимальное количество факторов в рамках имеющейся информации по каждому переделу. Однако следует отметить, что использование полных регрессионных моделей в планово-экономических расчетах неудобно из-за их громоздкости.

Размер моделей может быть существенно сокращен без значительного ущерба для точности расчетов. Для данного количества наблюдений число факторов в регрессионной модели должно равняться примерно семи-восьми. Для поиска этого набора могут использоваться различные методы, один из которых основывается на оценке коэффициентов стандартизованной регрессии (β -коэффициентов) и их средних стандартных отклонений. Кроме того, для проведения анализа и экономической интерпретации удобно представлять результирующие факторы (показатели эффективности работы технологической цепочки) в зависимости от единого набора признаков. Показателями эффективности работы алю-

миниевого завода, который является замыкающим технологическим переделом в цепочке по изготовлению готового металла, являются такие факторы, как объем реализации, выход по току, фондоотдача. Построение регрессионных уравнений от единого набора в данном случае тем более целесообразно, что исходя из оценки коэффициентов стандартизованной регрессии пользуются в основном одним и тем же набором факторных признаков для каждого результирующего показателя.

Для дальнейшего корреляционного и регрессионного анализа был отобран следующий набор факторов:

- x_1 — расход нефелиновой руды, т/т;
- x_2 — содержание Al_2O_3 в руде, %;
- $x_3(y_1)$ — содержание SiO_2 в шихте, %;
- $x_4(y_2)$ — содержание Al_2O_3 в шихте, %;
- $x_5(y_3)$ — объем шихты, тыс. т;
- $x_6(y_4)$ — содержание Fe_2O_3 в шихте, %;
- y_5 — производительность печей спекания, т/сут;
- y_6 — расход топлива при спекании, т/т;
- y_7 — температура спекания, °С;
- $y_8(z_1)$ — объем спека, тыс. т;
- $y_9(z_2)$ — содержание Fe_2O_3 в спеке, %;
- $y_{10}(z_3)$ — щелочной модуль в спеке, ед.;
- $y_{11}(z_4)$ — содержание класса + 8 мм в спеке, %;
- z_5 — кремниевый модуль обескремненного раствора, ед.;
- z_6 — теплоемкость в паропроводе, ккал;
- z_7 — давление при обескремнивании, атм;
- $z_8(t_1)$ — содержание влаги в гидрате, %;
- $z_9(t_2)$ — содержание SiO_2 в гидрате, %;
- $z_{10}(t_3)$ — содержание Na_2O в гидрате, %;
- $z_{11}(t_4)$ — выпуск гидрата, тыс. т;
- $z_{12}(t_5)$ — себестоимость гидрата, руб./т;
- $z_{13}(t_6)$ — извлечение, %;
- t_7 — температура кальцинации, °С;
- t_8 — себестоимость глинозема, руб./т;
- t_9 — выпуск глинозема, тыс. т;
- $t_{10}(u_1)$ — содержание Fe_2O_3 в глиноземе, %;
- $t_{11}(u_2)$ — содержание SiO_2 в глиноземе, %;
- $t_{12}(u_3)$ — содержание Na_2O в глиноземе, %;
- u_4 — частота обработок, ед.;
- u_5 — криолитовое отношение;
- u_6 — анодная плотность тока, а/см²;
- u_7 — падение напряжения в анодном контакте, мВ;
- $u_8(v_1)$ — фондоотдача основных фондов металлургического завода, коп./руб.;
- $u_9(v_2)$ — выход по току, %;
- $u_{10}(v_3)$ — объем реализации, млн. руб.

Факторы x_1, x_2 являются входными для подсистемы «подготовка сырья». Выходными для этого передела будут параметры $x_3 \div x_6$, которые одновременно являются входными для последующего технологического передела спекания. Па-

Таблица 6.1

Уравнения множественной регрессии

Уравнения	R ²
$y_1 = 26,235 - 0,04x_1 - 0,32x_2$	0,428
$y_2 = 4,974 - 0,183x_1 + 0,2656x_2$	0,338
$y_3 = 29,98 - 4,34x_1 + 0,682x_2$	0,407
$y_4 = 4,551 + 0,038x_1 - 0,097x_2$	0,91
$y_7 = 1542,075 + 8,99x_1 - 49,863x_2$	0,455
$z_1 = -22,874 + 1,709y_1 - 0,343y_2 + 0,694y_3 - 0,314y_4 +$ $+ 0,0008y_5 - 0,00008y_6 - 0,005y_7$	0,879
$z_2 = 5,0621 - 0,162y_1 + 0,0935y_2 - 0,0247y_3 + 0,2226y_4 +$ $+ 0,011y_5 - 0,00038y_6 - 0,00225y_7$	0,59
$z_3 = 1,7958 - 0,0265y_1 - 0,0628y_2 + 0,00135y_3 - 0,028y_4 -$ $- 0,0001y_5 - 0,00002y_6 + 0,00036y_7$	0,715
$z_7 = 84,527 - 3,8210y_1 + 1,136y_2 - 0,0358y_3 + 1,84y_4 -$ $- 0,089y_5 - 0,0111y_6 + 0,02767y_7$	0,528
$z_4 = -68,138 + 3,448y_1 + 2,508y_2 - 0,1y_3 - 1,218y_4 -$ $- 0,084y_5 - 0,00138y_6 + 0,0022y_7$	0,978
$t_1 = 21,2 - 0,0155z_1 - 0,175z_2 - 4,46z_3 + 0,174z_4 -$ $- 0,00166z_5 + 0,001z_6 - 0,012z_7$	0,508
$t_2 = 0,175 + 0,00066z_1 + 0,0115z_2 - 0,1375z_3 + 0,0002z_4 -$ $- 0,0000z_5 - 0,00001z_6 + 0,000z_7$	0,63
$t_3 = 2,1065 - 0,025z_1 + 0,19z_2 - 1,48z_3 - 0,025z_4 -$ $- 0,0000001z_5 - 0,00002z_6 + 0,003z_7$	0,623
$t_4 = 0,1595 + 0,1066z_1 + 0,095z_2 - 0,474z_3 + 0,013z_4 +$ $+ 0,00001z_5 + 0,00009z_6 - 0,0024z_7$	0,828
$t_5 = 119,38 - 4,86z_1 + 10,48z_2 + 51,83z_3 - 0,7z_4 - 0,00036z_5 -$ $- 0,003z_6 - 0,356z_7$	0,61
$t_6 = 81,061 + 0,34z_1 - 4,93z_2 + 7,485z_3 + 0,126z_4 -$ $- 0,00285z_5 + 0,0058z_6 - 0,199z_7$	0,726
$u_1 = -0,50851 + 0,0026t_1 + 0,826t_2 + 0,005t_3 + 0,02t_4 +$ $+ 0,0014t_5 + 0,0056t_6 + 0,00005t_7$	0,589
$u_2 = 0,0378 - 0,001t_1 + 1,13t_2 - 0,003t_3 - 0,009t_4 -$ $- 0,0001t_5 + 0,00016t_6 - 0,000001t_7$	0,843
$u_3 = 1,192 - 0,0006t_1 + 2,843t_2 - 0,43t_3 - 0,012t_4 - 0,000t_5 -$ $- 0,0133t_6 - 0,0000t_7$	0,91
$t_8 = -13,05 + 0,71t_1 - 114,11t_2 + 0,81t_3 + 5,838t_4 + 0,093t_5 -$ $- 0,077t_6 - 0,00147t_7$	0,914
$t_6 = 0,216 - 0,0011t_1 + 1,668t_2 + 0,018t_3 + 0,91t_4 - 0,0009t_5 -$ $- 0,0009t_6 + 0,00016t_7$	0,97
$v_1 = 30,165 - 42,39u_1 + 192,0u_2 - 43,13u_3 + 3,17u_4 +$ $+ 4,21u_5 + 16,3u_6 + 0,416u_7$	0,623
$v_2 = 119,155 - 4,78u_1 + 118,89u_2 - 15,99u_3 + 0,79u_4 -$ $- 9,61u_5 - 26,81u_6 + 0,044u_7$	0,629
$v_3 = 107,5 + 6,47u_1 - 1,43u_2 - 25,44u_3 - 0,205u_4 - 7,19u_5 -$ $- 54,37u_6 - 0,254u_7$	0,823

параметры $y_8 \div y_{11}$, являющиеся выходными для этого передела, будут одновременно входными для передела гидрохимии. Выходные параметры последнего — $z_5 \div z_{13}$. Из группы выходных показателей передела гидрохимии показатели $z_8 \div z_{13}$ являются одновременно входными для передела «кальцинация», замыкающего технологическую цепочку производства глинозема, а выходные параметры этого передела $t_{10} \div t_{12}$, характеризующие качество глинозема, входят в группу входных параметров передела электролиза, результатом деятельности которого является готовый металл. Поэтому выходные показатели этого передела есть граничный выход для всей системы в целом.

Построение статистических моделей работы отдельных технологических переделов. На основе окончательно отобранных существенных факторов были построены уравнения регрессии для отдельных переделов, которые приведены в табл. 6.1.

Полученные экономико-статистические модели дают возможность прогнозировать значения моделируемых показателей и анализировать влияние отдельных факторов. С помощью такой модели можно формировать варианты развития объекта, получать оценки различных показателей, проигрывать разные стратегии функционирования предприятий.

§ 4. Оптимизация технологического процесса производства глинозема и алюминия

На базе экономико-статистических моделей была проведена оптимизация режимов работы технологических переделов. При оптимизации всего производственного процесса в первую очередь встает вопрос о выборе критерия оптимальности. Обычно имеется несколько близких по ценности критериев, что обусловлено комплексностью конечных показателей производства, в которых находят отражение количество произведенного продукта, его качество, эффективность использования основных элементов производственного процесса.

В качестве основного показателя работы предприятий алюминиевой промышленности в настоящее время правомерно рассматривать объем реализованной продукции, так как главной задачей отрасли с народнохозяйственных позиций является увеличение выпуска готового металла. В исследуемой технологической цепочке для замыкающего передела задача сводилась к определению максимального значе-

ния реализации продукции при ограничениях как технологических, так и экономических, обусловленных наличием не только народнохозяйственных задач, но и интересов коллектива. Тогда целевая функция имеет вид:

$$v_3 \rightarrow \max, v_3 = -107,5 + 6,47u_1 - 16,43u_2 - 25,44u_3 - 0,205u_4 - 7,194u_5 - 54,37u_6 - 0,25u_7;$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \bar{v}_1 - 2\sigma \leq v_1 &= 30,165 - 42,39u_1 + 192,0u_2 - 43,13u_3 + 3,17u_4 + 4,21u_5 + \\ &+ 16,3u_6 + 0,416u_7 \leq \bar{v}_1 + 2\sigma; \\ \bar{v}_2 - 2\sigma \leq v_2 &= 119,155 - 4,78u_1 + 118,89u_2 - 15,99u_3 + 0,79u_4 - 9,61u_5 - 26,01u_6 + \\ &+ 0,044u_7 \leq \bar{v}_2 + 2\sigma; \\ \bar{u}_1 - 2\sigma \leq u_1 &\leq \bar{u}_1 + 2\sigma; \\ \bar{u}_2 - 2\sigma \leq u_2 &\leq \bar{u}_2 + 2\sigma; \\ \bar{u}_3 - 2\sigma \leq u_3 &\leq \bar{u}_3 + 2\sigma; \\ \bar{u}_4 - 2\sigma \leq u_4 &\leq \bar{u}_4 + 2\sigma; \\ \bar{u}_5 - 2\sigma \leq u_5 &\leq \bar{u}_5 + 2\sigma; \\ \bar{u}_6 - 2\sigma \leq u_6 &\leq \bar{u}_6 + 2\sigma; \\ \bar{u}_7 - 2\sigma \leq u_7 &\leq \bar{u}_7 + 2\sigma. \end{aligned}$$

Решение системы уравнений выводит целевую функцию на уровень 123,62 % от средней величины за рассматриваемый период. Оптимальный план достигается в граничных точках допустимого множества. По показателям фондоотдачи и выходу по току оптимальный план не выходит на границу области допустимых значений.

Целесообразность применения используемых ограничений может быть достигнута при учете специфики функционирования объекта, если оптимальный вариант будет принадлежать статистической совокупности.

Затем рассматривается задача оптимизации режима работы передела «кальцинация», замыкающего глиноземное производство. Результат деятельности этого передела непосредственно влияет на конечный результат работы тех-

нологической цепочки, так как технологические параметры процесса электролитического получения алюминия зависят от количества вредных примесей, поступающих с глиноземом. Последние являются входными характеристиками передела электролиза. Чем меньше примесей, тем с меньшими затратами ведется процесс электролиза. Следовательно, режим работы и критерий оптимизации передела кальцинации определяется из условий оптимального режима работы алюминиевого завода.

Анализ уравнений регрессии показал, что на целевую функцию особенно сильное влияние оказывает показатель u_3 , характеризующий содержание щелочи в глиноземе по сравнению с содержанием кремния и железа. Это объясняется тем, что на катоде происходит выделение металлического натрия при избытке щелочи в электролите. Количество выделившегося натрия невелико, но на это требуется электроэнергия, что, в свою очередь, уменьшает выход по току. Следовательно, электролизный передел «заинтересован» в уменьшении содержания щелочи в глиноземе. Тогда для передела «кальцинация» задача может быть поставлена так:

$$u_3 \rightarrow \min, u_3 = 1,192 - 0,0006t_1 + 2,843t_2 + 0,43t_3 - 0,012t_4 - 0,0005t_5 - 0,0133t_6 - 0,00008t_7.$$

Исходя из результатов решения первой задачи, задаем ограничения на содержание Fe_2O_3 и SiO_2 в глиноземе. Так как первый показатель вышел на верхнюю границу, ограничивать его целесообразно интервалом от \bar{u}_2 до $\bar{u}_2 + 2\sigma$. Для второго показателя, вышедшего на нижнюю границу, соответствующий интервал — $[\bar{u}_1 - 2\sigma; \bar{u}_1]$.

Самостоятельность глиноземного комбината, являющегося административно обособленным предприятием, находящимся на хозяйственном расчете, требует учета в моделях данного производства собственных интересов, которые находят отражение в показателях себестоимости глинозема и объема его выпуска. Поэтому на эти показатели вводятся дополнительные ограничения, которые определяются как средние значения $\pm 2\sigma$. В этом случае вся система ограничений имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 - 2\sigma \leq u_1 &\leq \bar{u}_1; \\ \bar{u}_2 \leq u_2 &\leq \bar{u}_2 + 2\sigma. \\ u_1 &= -0,508 + 0,0026t_1 + 0,826t_2 + 0,005t_3 + \\ &+ 0,02t_4 + 0,0014t_5 + 0,056t_6 + 0,00005t_7; \end{aligned}$$

$$u_2 = 0,037 - 0,001t_1 + 1,13t_2 - 0,003t_3 - \\ - 0,009t_4 - 0,0001t_5 + 0,00016t_6 - 0,000001t_7;$$

$$\bar{t}_8 - 2\sigma \leq t_8 \leq \bar{t}_8 + 2\sigma;$$

$$t_8 = -13,05 + 0,71t_1 - 114,11t_2 + 0,81t_3 + \\ + 5,83t_4 + 0,0936t_5 - 0,077t_6 - 0,00147t_7;$$

$$\bar{t}_9 - 2\sigma \leq t_9 \leq \bar{t}_9 + 2\sigma;$$

$$t_9 = 0,216 - 0,0011t_1 + 1,668t_2 + 0,018t_3 + \\ + 0,91t_4 + 0,0009t_5 - 0,0009t_6 + 0,00016t_7;$$

$$\bar{t}_1 - 2\sigma \leq t_1 \leq \bar{t}_1 + 2\sigma;$$

$$\bar{t}_2 - 2\sigma \leq t_2 \leq \bar{t}_2 + 2\sigma;$$

$$\bar{t}_3 - 2\sigma \leq t_3 \leq \bar{t}_3 + 2\sigma;$$

$$\bar{t}_4 - 2\sigma \leq t_4 \leq \bar{t}_4 + 2\sigma;$$

$$\bar{t}_5 - 2\sigma \leq t_5 \leq \bar{t}_5 + 2\sigma;$$

$$\bar{t}_6 - 2\sigma \leq t_6 \leq \bar{t}_6 + 2\sigma;$$

$$\bar{t}_7 - 2\sigma \leq t_7 \leq \bar{t}_7 + 2\sigma.$$

Полученное значение целевой функции этой задачи показывает, что содержание щелочи в глиноземе можно довести до 53,16 % от средней за исследуемый период величины, т. е. сократить почти вдвое.

Оптимальное значение показателя, как и в предыдущей задаче, находится в интервале $\pm 2\sigma$ от его среднего значения. Поэтому нет необходимости проверять оптимальный план на принадлежность к исходной совокупности, так как все остальные параметры изменялись в заранее заданных статистически определенных границах. Результаты решения оптимизационной задачи свидетельствуют о том, что повышение качества глинозема имеет резервы нахождения лучшего варианта, поскольку содержание вредных примесей SiO_2 и Fe_2O_3 не вышло на нижние статистически определенные границы.

Основным независимым факторным признаком является температура кальцинации, которая в значительной мере определяет выход и качество глинозема. Комбинат же в течение ряда лет не работал в технологических рамках по этому показателю, так как данный химический состав вредных примесей в глиноземе требовал повышения температуры кальцинации. В наших расчетах значение температуры выш-

ло на верхнюю границу. Это, в свою очередь, увеличивает себестоимость по сравнению со средним уровнем и снижает среднесуточный объем выпуска глинозема. Вместе с тем следует отметить, что за счет улучшения качества продукции электролизный передел может увеличить объем реализации по сравнению с оптимально рассчитанным уровнем. Здесь возникает дополнительная задача принятия решений на основе соизмерения потерь и выигрышей отдельных предприятий.

Для других технологических переделов задачи решались аналогичным образом. В результате для передела гидрохимии критерием эффективности был выбран показатель t_3 , характеризующий примеси щелочи в гидрате. Решение показало, что он может быть доведен до 39,5 % от среднего уровня. Содержание кремния (SiO_2) так же, как и влаги, в гидрате в этом случае увеличится примерно на 5 % по сравнению со средним уровнем. Себестоимость гидрата уменьшится на 19,1 % при одновременном увеличении выпуска гидрата (на 2,3 %) и извлечения Al_2O_3 (на 5,1 %).

Для передела спекания в роли критерия эффективности выступал показатель «щелочной модуль». Полученный оптимальный план показал, что щелочной модуль спека может быть увеличен на 4,1 % от среднего уровня. Примеси железа в пересчете на Fe_2O_3 будут находиться на верхнем уровне допустимых значений, что составит 111,9 % от среднего значения. Объем спека так же будет находиться на верхнем уровне, что на 11,1 % выше среднего значения. Давление при обескремнивании уменьшится на 4,7 % от среднего значения. Достигается простот реализованной продукции металлургического завода.

Граничным переделом в рассматриваемой технологической цепочке является цех приготовления шихты. Его задачей должно стать увеличение содержания ценного компонента — Al_2O_3 . Решение системы уравнений для данного передела свидетельствует о том, что содержание Al_2O_3 в шихте может поддерживаться на уровне на 0,8 % выше своего среднего значения при расходе нефелиновой руды на 5,15 % меньше среднего уровня. При этом содержание ценного компонента в руде должно быть на 0,9 % больше среднего уровня, а температура спекания будет значительно ниже (на 5,88 %) среднего уровня, что должно положительно сказаться на экономических показателях последующих переделов.

Таким образом, несовпадение экономических интересов различных уровней в системе критериев эффективности социалистического хозяйства может быть предотвращено. Под-

чинение локальных решений общей цели возможно лишь при условии, что измерители затрат и результатов деятельности соответствуют принципам народнохозяйственного оптимума. Предлагаемый вариант сочетания технологических параметров по всей технологической цепочке позволит значительно увеличить конечный показатель эффективности (реализацию продукции) алюминиевого завода.

Выбор предлагаемых критериев оптимизации можно объяснить тем, что показатели качества сырья и полупродуктов оказывают существенное влияние на результаты работы всей технологической цепочки. Однако им обычно уделяется меньше внимания, чем показателям затрат, хотя на отлаженных технологических цепочках лишь отыскание и стабилизация наиболее рациональных технологических режимов ведения процессов могут повысить эффективность производства. При этом возрастают требования к качеству сырья и полуфабрикатов.

Глава 7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВНУТРИПРОИЗВОДСТВЕННОГО ХОЗРАСЧЕТА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

§ 1. Постановка задачи

Согласно закону «О предприятиях в СССР», предприятие состоит из действующих на началах внутреннего хозяйственного расчета или коллективного подряда подразделений: производств, цехов, отделений, участков и др.

В рамках хозяйственного расчета решаются следующие основные проблемы:

соизмерение затрат и результатов производственно-хозяйственной деятельности в денежной форме;

обеспечение согласованности целей и интересов производственных систем разного уровня как между собой, так и с народнохозяйственными целями и интересами;

достижение максимальной эффективности функционирования производственных систем и отдельных участников процесса изготовления продукции.

Формы хозяйственного расчета предприятий в целом одинаковы во всех отраслях промышленности. Применение же принципов хозрасчета в управлении отдельными подразделениями предприятия требует учета организации производ-

ства и технологии на данном участке. При осуществлении внутризаводского хозрасчета руководствуются Типовыми положениями о внутризаводском хозрасчете предприятий системы соответствующего министерства с учетом особенностей отдельных подотраслей и предприятий. Внутризаводской хозрасчет включает в себя организацию взаимных расчетов между подразделениями, учет и анализ результатов хозяйственной деятельности, организацию материального поощрения трудящихся. Цехам, участкам, бригадам, службам устанавливаются плановые и оценочные показатели.

Так, основным цехам металлургических заводов, как правило, устанавливаются следующие показатели:

- 1) объем продукции в натуральных физических или условных единицах, включая показатели качества, с выделением продукции на экспорт;
- 2) себестоимость единицы продукции;
- 3) фонд заработной платы и штат трудящихся;
- 4) производительность труда;
- 5) задания по освоению новых видов продукции, внедрению новых технологических процессов, механизации и автоматизации производства и другие задания по новой технике, имеющие важное значение для развития предприятия и отрасли.

Годовые, квартальные и месячные планы, доводимые до бригад, содержат показатели объема производства в натуральном, а зачастую и в стоимостном выражении и показатели качества. Кроме того, у коллективов бригад имеются нормативные сведения, а также планы по труду и заработной плате, включающие такие показатели, как среднесписочная численность, фонд заработной платы, трудоемкость продукции, производительность труда.

Расход каждого вида сырья и материалов определяется исходя из утвержденных норм и объема производства на соответствующий период. Помимо этого, бригаде планируется внедрение организационно-технических мероприятий, новой техники, технологии, изобретений и рационализаторских предложений. Между бригадами и подразделениями, обслуживающими их, вводится внутрицеховая материальная ответственность.

Основными показателями, по степени выполнения которых оценивают результаты деятельности коллектива подразделения, являются объем продукции и ее себестоимость или затраты по переделу. Аналогичная ситуация наблюдается и в других отраслях промышленности с непрерывным или периодическим производственным циклом.

Если, например, цех выполняет план по объему производства и себестоимости обработки, не превышая при этом плановых объемов фонда заработной платы и производственных фондов, то, согласно положению о внутриводском хозрасчете, он получает определенную сумму для поощрения работников цеха. Если план по этим показателям не выполняется, то доля данного подразделения в заводской прибыли и соответственно в фондах экономического стимулирования уменьшается. Однако заработная плата и основные производственные фонды в цехах предприятий с непрерывным производственным циклом изменяются незначительно. Количество основных агрегатов, а следовательно, и рабочих мест строго регламентировано технологической схемой производства. Поэтому фактически работа цеха оценивается по объемам продукции и затратам на ее изготовление.

Хозрасчетные отношения между цехами, участками и бригадами регулируются путем взаимного предъявления претензий. Эти претензии рассматриваются обычно в случае явного нарушения хозрасчетных правил, когда размер убытков, понесенных тем или иным подразделением по вине другого, можно рассчитать непосредственно. При этом остается незатронутой следующая проблема. На предприятиях с непрерывным производственным циклом значительная часть характеристик сырья и полуфабрикатов, а также технологических параметров имеет достаточно большую свободу варьирования. Разумеется, и здесь есть строгие границы, предусмотренные технологическим регламентом, но все же допускаемый разброс довольно велик. Для выявления влияния таких изменений внутри допустимых границ на работу смежных подразделений необходимо использовать методы математической статистики.

§ 2. Примеры использования статистических моделей для совершенствования внутриводского хозрасчета

На Магнитогорском металлургическом комбинате была разработана методика обоснования доплат и скидок за качество чугуна при взаимных расчетах между доменными и мартеновскими цехами [Веселов и др., 1979]. Качество чугуна определяется содержанием в нем серы. Методика базируется на следующих положениях:

1) получение чугуна с пониженным содержанием серы вызывает рост удельного расхода кокса и снижение производительности доменной печи;

2) использование чугуна с пониженным содержанием серы в мартеновских печах повышает их производительность;

3) граничным значением содержания серы в чугуне (при котором доплаты переходят в скидки) является средняя арифметическая, определяемая по данным о фактическом содержании серы;

4) доплаты должны компенсировать дополнительные расходы по производству чугуна при снижении содержания серы. Большая часть суммы экономического эффекта (примерно 70 %), получаемого в последующем переделе (мартеновском) при использовании чугуна с пониженным содержанием серы, должна передаваться доменному цеху. Скидки должны компенсировать дополнительные расходы по производству стали при повышении уровня содержания серы в чугуне. Основанием для расчета доплат и скидок явились следующие уравнения, характеризующие зависимость себестоимости чугуна и стали от содержания серы (S) в чугуне:

Цех	Уравнение
Доменный	$Z_d = -19,29 S + 20,51$
Мартеновский № 1	$Z_{m1} = 40,60 S + 6,89$
Мартеновский № 2	$Z_{m2} = 97,48 S + 6,82$
Мартеновский № 3	$Z_{m3} = 90,83 S + 8,23$

Здесь Z_d — эксплуатационные затраты в доменном цехе; Z_{m1} , Z_{m2} , Z_{m3} — эксплуатационные затраты в мартеновских цехах № 1, 2 и 3.

В результате в положение о хозяйственном расчете введены доплаты и скидки за качество чугуна (табл. 7.1).

В практических целях доплаты и скидки установлены за содержание серы в определенном интервале. Это, естественно, менее точно, чем непрерывные доплаты и скидки, но за-

Таблица 7.1

Доплаты и скидки за качество чугуна, учитываемые в мартеновских цехах № 1, 2 и 3 (на 1 т чугуна), руб.

Содержание серы в чугуне, %	Цех № 1		Цех № 2		Цех № 3	
	Доплаты	Скидки	Доплаты	Скидки	Доплаты	Скидки
$0,020 <$	0—30	—	0—61	—	0—38	—
$0,021—0,025$	0—05	—	0—13	—	0—04	—
$0,026—0,030$	—	0—12	—	0—29	—	—
$0,031—0,035$	—	0—31	—	0—78	—	0—82
$>0,035$	—	1—09	—	2—04	—	1—18

то удобнее для экономических расчетов и нагляднее для работников цехов.

Другой путь использования статистических моделей во внутризаводском хозрасчете — определение влияния тех или иных факторов на показатели деятельности предприятия в целом. Такой подход целесообразен в следующих случаях:

когда нельзя с необходимой точностью оценить дополнительные затраты на изменение данного фактора в цехе, производящем полуфабрикат или полупродукт, и экономический эффект непосредственно в цехе-потребителе;

когда изменение того или иного фактора в данном подразделении влияет на показатели работы не только смежных цехов и участков, но и других, отделенных несколькими звеньями в технологической цепочке.

В таких ситуациях необходимо построение модели предприятия в целом, состоящей из системы взаимосвязанных уравнений регрессии. В этой системе расчет влияния каждого фактора на экономические показатели можно проводить как непосредственно, если данный фактор входит в уравнение регрессии для соответствующего показателя, так и опосредованно, через цепочку взаимосвязей. Возможны различные ситуации. Если производственный процесс достаточно прост, то и математическая модель его может быть относительно простой. Если же исследуется достаточно сложное производство, соответственно сложной должна быть и модель.

Могут различаться и способы организации хозрасчета на предприятиях. Так, на некоторых предприятиях для расчетов между подразделениями используются внутризаводские цены, а на других их нет. Это также необходимо учитывать при моделировании. Рассмотрим два примера, взятых из реальной практики, но несколько упрощенных.

На одном из цементных заводов внедрен внутризаводской хозяйственный расчет, на который переведены все основные и вспомогательные цехи завода. Денежным измерителем объема выпуска продукции цехов является условно расчетная внутризаводская цена. Она складывается из себестоимости и плановой прибыли, которая распределяется по цехам пропорционально фонду заработной платы и производственным фондам. Прибыль цехов является источником формирования их фондов материального поощрения и социального развития.

Задача статистической оценки влияния показателей работы отдельных цехов на величину прибыли завода решалась

для трех основных цехов: подготовки сырья, обжига клинкера, помола цемента.

Способ перераспределения прибыли по цехам (переделам) может быть представлен в виде следующего набора правил.

1. Рассчитывается совокупная прибыль, получаемая исследуемой группой цехов в данном месяце согласно принятой на заводе методике.

2. С использованием методов корреляционного и регрессионного анализа находятся основные факторы, характеризующие работу цехов. В нашем примере таковыми выбраны:

Цех подготовки сырья

x_1 — тонкость помола шлама (остаток на сите), %

x_2 — влажность шлама, %

x_3 — расход электроэнергии на шлам, кВт·ч/т

Цех обжига клинкера

x_4 — объем производства клинкера, т/сут

x_5 — расход электроэнергии на клинкер, кВт·ч/т

x_6 — расход условного топлива, кг/т

Цех помола цемента

x_7 — объем потребленного клинкера, т/сут

x_8 — средняя марка цемента, кг/см²

x_9 — расход электроэнергии на помол, кВт·ч/т

Результирующий показатель: x_{10} — расчетная прибыль трех цехов, руб./сут.

Уравнение множественной регрессии имеет вид:
 $x_{10} = 7635,8 + 386,7x_1 + 171,4x_2 - 501,1x_3 + 2,422x_4 - 5,77x_5 - 69,97x_6 + 0,584x_7 + 0,113x_8 - 34,73x_9$.
Здесь коэффициенты регрессии показывают, насколько и в каком направлении изменится функция при изменении данного фактора-аргумента на единицу.

3. По итогам месяца для каждого фактора определяется разница между фактическим и плановым значением его величины.

4. Полученные в п. 3 значения умножаются на соответствующие коэффициенты уравнения регрессии и получают отклонения факта от плана по факторам в единицах прибыли. Эти отклонения суммируются с учетом знака.

5. Из общей прибыли (п. 1) вычитается сумма отклонений.

6. Полученный остаток прибыли распределяется по цехам согласно принятой на заводе методике.

7. Находятся суммы отклонений в единицах прибыли по каждому цеху в отдельности. Полученные суммы (в данном случае их три) прибавляются к суммам, полученным по рас-

Т а б л и ц а 7.2

Расчет влияния отклонений фактических значений показателей работы цехов от плановых на прибыль завода

Цех, показатель	Значение		Отклоне- ние (факт— план)	Кэффи- циент рег- рессии	Произведение отклонения на коэффи- циент регрессии
	Плановое	Факти- ческое			
Цех подготовки сырья					
Тонкость помола шлама	4,27	4,27	0	386,7	0
Влажность шлама	37,8	37,8	0	171,4	0
Расход электро- энергии на шлам	4,70	4,56	-0,14	-501,3	70,2
Цех обжига клинкера					
Объем производ- ства клинкера	4166,7	4261,3	94,6	2,422	229,1
Расход электро- энергии на клин- кер	28,50	26,07	-2,43	-5,77	14,0
Расход условного топлива	216,7	216,5	-0,2	-69,97	14,0
Цех помола цемента					
Объем потреблен- ного клинкера	3980,0	3998,4	18,4	0,584	10,7
Средняя марка цемента	439,9	439,9	0	0,113	0
Расход электро- энергии на помол	32,5	30,9	-1,6	-34,73	55,6

пределению остатка прибыли по цехам (п. 6). Это дает возможность рассчитать фонд прибыли цеха, в значительной степени зависящей от его деятельности.

Перейдем к фактическим расчетам. Имеются данные о работе трех цехов за месяц. Объемные показатели рассчитаны как средние дневные. Данные приводятся в табл. 7.2.

Среднесуточная прибыль по цехам до перераспределения составляла (руб.):

Цех подготовки сырья	2745,7
Цех обжига клинкера	4730,0
Цех помола цемента	1856,9

Всего . . . 9332,6

Из общей прибыли вычитается сумма отклонений. Отметим, что все они, т. е. произведения отклонений на коэффициенты регрессии, являются положительными или нулевыми.

ми. Это значит, что ни по одному показателю не имело место отклонение факта от плана в сторону ухудшения. В результате получаем:

$$9332,6 - 70,2 - 229,1 - 14,0 - 14,0 - 10,7 - 55,6 = 8939,0.$$

В долевом отношении прибыль распределялась в данном месяце по цехам следующим образом: цех подготовки сырья — 29,42 %; обжига клинкера — 50,66; помола цемента — 19,92 %. Соответственно распределялся остаток прибыли, и к полученной прибыли каждого цеха прибавлялась сумма отклонений по показателям данного цеха. Получаем объемы среднесуточной прибыли по цехам (руб.):

Цех подготовки сырья	2700,1
Цех обжига клинкера	4785,6
Цех помола цемента	1846,9

Таким образом, хотя ни один цех не ухудшил показателей своей работы, произошло некоторое перераспределение прибыли в пользу тех, кто внес наибольший вклад в рост заводской прибыли. Доля цехов стала составлять: цех подготовки сырья — 28,93 %, обжига клинкера — 51,28, помола цемента — 19,79 %, т. е. выросла доля цеха обжига клинкера при соответствующем снижении доли остальных цехов. Соответственно изменятся и размеры формируемых из прибыли фондов материального поощрения и социального развития.

В следующем примере объектом исследования является технологически связанная система, включающая алюминиевый завод и глиноземный комбинат. Алюминиевый завод представлен технологическим переделом «электролиз», а глиноземное производство состоит из четырех цехов: приготовления шихты, спекания, гидрохимии, кальцинации. Поступающее на переработку сырье проходит через все технологические переделы производства металла. Любое отклонение от оптимальных режимов ведения процесса на одном из переделов может изменить характеристики конечного продукта.

Задача определения сквозного влияния независимых параметров на результаты работы предприятия решается после того, как построена согласованная система критериев работы технологических переделов (см. гл. 6). Для управления производством надо знать возможный диапазон изменения параметров производства. С этой целью необходимо определить минимально и максимально возможные уровни показателей (как независимых, так и зависимых), которые

рассчитываются по схеме вход — выход, исходя из сложившихся реальных условий технологического процесса. Они достигаются определенными сочетаниями входных независимых параметров. Представляет интерес, в какой степени отклонение любого из параметров влияет на конечный результат через систему промежуточных входов и выходов.

Поиск экстремумов и изучение влияния независимых параметров на работу переделов целесообразно начинать с ограничения области изменения параметров. Для каждого из параметров известны максимальное и минимальное значения, наблюдаемые в течение периода, за который брались данные для построения статистической модели. Варьируя параметры в заданных пределах от верхнего уровня до нижнего, получаем спектр значений результатов, среди которых имеются максимальные и минимальные по любому из критериев.

Рассмотрим задачу на максимум эффективности (на промежуточных стадиях используются локальные критерии, отобранные при построении согласованной системы критериев). При линейности систем уравнений множественной регрессии, описывающих функционирование каждого передела, можно доказать, что в точке максимума значения всех независимых параметров всех переделов находятся на границе областей изменения, т. е. на верхнем либо на нижнем уровне. Для одного передела это очевидно: уравнение, определяющее значение некоторого выбранного критерия y_j для этого передела имеет вид $y_j = y_{0j} + a_{1j}x_1 + \dots + a_{nj}x_n$. Пусть максимум y_j реализуется при всех x_i , находящихся на границах их областей изменения $\{x_i^{\min}, x_i^{\max}\}$, за исключением некоторого x_k . Тогда x_k всегда можно изменить так, чтобы увеличить y_j . Проведем эту операцию со всеми x_i , $i = 1, n$, получим максимум y_j при всех x_i на границах их областей изменения. Перейдя ко второму переделу, где уравнение критерия: $z_i = z_0 + a_{i1}y_1 + \dots + a_{in}y_n$, ту же операцию максимизации (минимизации) проведем со всеми y_j по отношению к z_i и т. д. Для n переделов высказанное предположение доказывается по индукции.

То обстоятельство, что экстремальные значения достигаются на границах интервалов изменения независимых параметров, существенно упрощает поиск экстремумов. После нахождения экстремумов можно определить влияние каждого независимого параметра на показатели работы промежуточных и конечного переделов. Для этого на ЭВМ имитируется последовательное варьирование всех независимых параметров, при котором соблюдается условие: если экстре-

муму соответствует верхний уровень некоторого параметра, то этот параметр следует уменьшать, и наоборот. Варьирование параметров позволяет рассчитать сквозной коэффициент эластичности K_{ij} на каждом переделе, определяемый для одного передела и одного параметра x_i следующим образом: $K_{ij} = \Delta y_j / \Delta x_i$, где Δy_j — изменение показателя y_j при изменении x_i на α , %; Δx_i — процент изменения x_i ; i — индекс независимого параметра ($i = 1, \dots, n$); j — индекс зависимого параметра ($j = 1, \dots, m$).

Изменение Δx_i обычно выбирается равным одному проценту величины соответствующего параметра. Изменение каждого x_i на 1 % приводит к изменению каждого y_j на величину $\pm \Delta y_j$. В свою очередь, изменение y_j на Δy_j ведет к изменению выходных параметров второго передела на некоторую величину Δz_i и т. д. Таким образом рассчитываются коэффициенты эластичности, первоначальной информационной базой для которых явились коэффициенты множественной регрессии. Расчеты выполняются на ЭВМ по специальным программам.

Покажем фрагмент расчета влияния изменения отдельных параметров на показатели работы предприятия. Оценивалось влияние на объем реализации продукции алюминиевым заводом независимых параметров работы первых двух технологических переделов: приготовления шихты и спекания. Были взяты параметры: x_1 — удельный расход нефелиновой руды, т/т; x_2 — содержание Al_2O_3 в руде, %; y_5 — производительность печей спекания, т/сут; y_6 — расход топлива при спекании, т/т; y_7 — температура спекания, °С. Результаты расчетов приведены в табл. 7.3. Коэффициенты эластичности, рассчитаны по специальной программе на ЭВМ. Информационной базой служили уравнения множественной регрессии по всем переделам. Как видно из таблицы, при изменении расхода руды на 1 % объем реализации изменяется на 0,117 %, при снижении содержания Al_2O_3 в руде на 1 % реализация продукции падает на 0,703 % и т. д. Однако возможное влияние определяется не только величиной коэффициента эластичности, но и размахом вариации данного параметра (отклонением минимального значения от максимального). И если наибольший из приведенных в таблице коэффициент эластичности у параметра x_2 , то наибольший размах вариации имеет y_6 — удельный расход топлива при спекании. Однако за счет этих параметров возможны относительно небольшие изменения критерия эффективности. Наиболее сильно изменить общий критерий, как видно из табл. 7.3 можно, изменяя параметры y_7 и y_5 , не вы-

Таблица 7.3

Расчет влияния независимых параметров на объем реализованной продукции, %

Параметр	Коэффициент эластичности	Отклонение минимального значения от максимального	Возможное изменение критерия эффективности за счет параметра
x_1	0,117	9,85	1,153
x_2	0,703	1,64	1,15
Итого по I переделу	—	—	2,303
y_5	0,27	20,98	5,70
y_6	0,052	31,98	1,67
y_7	0,227	25,45	5,77
Итого по II переделу	—	—	13,14

деляющиеся в отдельности по размерам коэффициента эластичности или размаха вариации. Таким образом, можно оценить влияние изменений в сырье или параметрах ведения технологического процесса даже на первых переделах на конечные показатели деятельности предприятия. Такой подход может быть использован в оперативном управлении производством.

Изменения критерия эффективности за счет независимых параметров можно суммировать (см. табл. 7.3). Во внутри-заводском хозрасчете влияние отклонений фактических значений от плановых по каждому переделу определяется как сумма отклонений по всем независимым факторам, принадлежащим данному переделу. В соответствии с результатами работы предприятия и его подразделений перераспределяются части фондов материального поощрения и социального развития, на которые данные фонды увеличились или уменьшились. Разберем условный пример. Пусть за счет работы первого передела критерий эффективности предприятий увеличился на 1 %, а за счет работы второго передела уменьшился на 2 % по сравнению с планом. Другие подразделения выполнили плановые задания. В результате план предприятия выполнен на 99 %, соответственно фонд материального поощрения уменьшился на 3 %. Тогда коллектив первого передела должен получить прибавку к фонду материального поощрения, равную той, которая была бы,

если бы предприятие выполнило план на 101 %. Коллектив второго передела должен полностью возместить убытки предприятия (3 % всего фонда материального поощрения), а также прибавку, выплаченную коллективу первого передела. Соответственно, если при перевыполнении плана по предприятию в целом некоторые подразделения план не выполнят, их фонд материального поощрения должен быть ниже планового.

Глава 8

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА РУД НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

§ 1. Постановка задачи

Результативные показатели работы и характер технологии переработки в таких отраслях, как цветная и черная металлургия, в значительной степени определяются качеством используемого минерального сырья. Поэтому в рамках общей проблемы оптимизации режимов функционирования горно-металлургических предприятий важная роль принадлежит задаче оценки влияния качества руд на эффективность хозяйственной деятельности и на выбор оптимальной стратегии управления процессами добычи и обогащения сырья с позиций конечных результатов производства в целом. Это и обуславливает выделение задачи управления качеством руд как предмета самостоятельного исследования, присущего всем производствам, связанным с переработкой минерального сырья.

Программа управления качеством на горно-металлургическом комбинате (ГМК) создается для целенаправленного улучшения его деятельности по повышению качества продукции и эффективности производства. Для системы управления качеством необходима информация о совокупности элементов (объектов) предприятия, состояние которых изменяется в результате ее функционирования. Желаемые значения конечных показателей деятельности предприятия и его структурных элементов задают комплекс целей, на основе которого формируется соответствующая структура функций и задач системы, определяются механизмы и методы управления, устанавливаются необходимые ресурсы. Сис-

темные методы управления качеством предполагают переход от решения отдельных разрозненных задач к реализации комплекса взаимосвязанных и взаимообусловленных мероприятий.

Информационная основа управления качеством продукции ГМК — детальный геолого-экономический анализ изменчивости минерального состава и технологических свойств руд.

Одной из важнейших проблем, возникающих при разработке месторождений, является создание системы управления качеством руд и технологическими процессами с учетом основных геолого-минералогических особенностей руд. При этом к качеству руды относится ее минеральный и химический состав, структурно-текстурные особенности и физические свойства.

Под управлением качеством понимается совокупность операций, изменяющих состав и свойства руд с целью достижения оптимальных показателей их переработки. Наиболее часто применяется усреднение руд, направленное на выравнивание содержания полезных, реже — некоторых вредных компонентов руд при их добыче, транспортировке или складировании. Усреднение обычно производится внутри промышленных сортов руд, различающихся между собой содержанием полезных компонентов, определяемых по результатам химического опробования на основе кондиций и требующих раздельного оконтуривания и подсчета запасов.

Такой путь может быть оправдан для железных руд с небольшим количеством рудных минералов (магнетит, гематит), где главным фактором, влияющим на обогащение является количество (иногда и форма локализации) железа.

Для руд цветных металлов большое разнообразие минерального состава далеко не всегда соответствует изменению содержания полезных компонентов. Схемы и показатели переработки определяются целым рядом особенностей руды, причем количество полезных компонентов часто не является решающим или даже значимым признаком. Прямая связь обогатимости руд с кондициями наблюдается далеко не всегда.

Следовательно, для правильного решения проблемы управления качеством руд необходимо оценить значение для обогащения всех геолого-минералогических факторов.

Общий подход к оптимизации технологического режима действующих предприятий состоит в том, что выбор и определение расчетных параметров производят последовательно от конечной операции (получение готового продукта) к на-

чалу технологической цепочки (см. гл. 6). Предварительным исследованием определяются технологические зависимости между входными и выходными параметрами в каждой операции, а затем — значения параметров от конца схемы.

Технологические цепочки, как и обогатительные фабрики, в целом оптимизируются по экономическим критериям. Экономическая эффективность является совокупным показателем, определяющим компромисс между качеством продукта, степенью извлечения, производительностью установки и затратами на переработку сырья.

Эффективность каждой последующей операции зависит от параметров поступающего сырья, которые формируются в предыдущей ступени. Например, извлечение ценного компонента в металлургическом переделе и его себестоимость зависят от качества концентрата обогащения. Извлечение ценного компонента на обогатительной фабрике, качество концентрата, себестоимость переработки руды и себестоимость получаемого на фабрике продукта зависят от качества исходной руды, в частности, от количества и состава вредных для технологии обогащения примесей, степени усреднения, очередности поступления на фабрику различных сортов руды и т. д. Качество руды, в свою очередь, зависит от параметров горного передела. При этом себестоимость добытой руды тем ниже, чем выше разубоживание и в большинстве случаев потери полезного компонента в недрах.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что увеличение значений факторов, улучшающих технико-экономические показатели последующей ступени, снижает, как правило, эти показатели для данной ступени. Так, повышение качества концентрата обогащения улучшает показатели металлургического передела, в то время как его себестоимость и извлечение при обогащении ухудшаются.

Вследствие этого невозможно сформулировать общий критерий оптимизации для подсистем, согласующийся с выходным критерием для всей системы. Например, максимизация извлечения при обогащении будет повышать себестоимость и снижать качество концентрата. Минимизация себестоимости в одних циклах связана с повышением себестоимости в других. Таким образом, в каждой подсистеме необходимо сформулировать свой критерий и набор ограничений, связанных с функционированием следующего цикла и всей технологической цепочки в целом.

На себестоимость продукции обогатительной фабрики наиболее существенное влияние оказывает качество пере-

рабатываемой руды (в первую очередь содержание извлекаемого металла) и объем переработки.

Рассмотрение горно-металлургического комплекса как единой экономической системы позволяет на основе формулировки общего критерия эффективности таким образом изменить параметры работы каждого цикла, чтобы вся система давала максимальный экономический эффект.

Все вышесказанное относилось к оптимизации технологического режима на действующем предприятии и затрагивало аспекты повышения эффективности производства без существенного дополнительного привлечения капитальных вложений. В то же время результаты исследования проблемы управления качеством сырья могут быть использованы и при решении стратегических задач развития отдельных горно-металлургических предприятий и отрасли в целом.

Общезвестно, что основным направлением технического прогресса в обогащении руд является применение нового, более мощного и производительного оборудования. Абстрагируясь от технических и технологических тонкостей, можно считать, что идеальная современная обогатительная фабрика должна иметь на каждой технологической операции один агрегат, единичная мощность которого отвечает производительности всей фабрики. В самом деле, такая фабрика имела бы наиболее высокие показатели, характеризующие эффективность обогатительного производства: наименьшую себестоимость переработки руды и удельную фондоемкость, наибольшую производительность труда и рентабельность.

Однако развитие указанной тенденции нередко вступает в противоречие с требованием наиболее полного комплексного использования минерального сырья. Месторождения руд цветных металлов, как известно, характеризуются зональностью, неравномерностью распределения полезных компонентов и наличием нескольких природных и технологических типов руд, характер локализации которых допускает их раздельную переработку и добычу или создание новых технологических типов из отбитой горной массы. Это обстоятельство создает потенциальную возможность более совершенного с точки зрения конечных результатов выбора способа обогащения руды. Природные типы руд характеризуются вполне определенными свойствами, в результате чего для каждого из них можно разработать наиболее эффективную схему и режимы обогащения. Кроме того, изменчивость качества руды для отдельных типов значительно меньше, чем для всей перерабатываемой массы.

Таким образом, при создании обогатительных фабрик возникает альтернатива: валовая переработка руды в одном потоке с использованием высокопроизводительного современного оборудования или выделение типов руд с их раздельной переработкой и соответственно этому создание на фабрике нескольких секций с менее мощным оборудованием.

В работе А. И. Топоровского [1979] показано, что нарушение принципа конечной эффективности часто дает видимый экономический эффект на обогатительных предприятиях за счет применения оборудования большой единичной мощности, но приводит к значительным потерям металлов по отрасли в целом.

Очевидно, вопрос об управлении качеством руд должен решаться отдельно в каждом конкретном случае на основе единого методологического подхода с экономической оценкой каждого варианта или их совместной комбинации с целью выбора наиболее целесообразного пути управления качеством.

Так, при разработке процесса обогащения медно-никелевых руд Талнахского месторождения основанием для выбора технологической схемы послужил подсчет запасов, в котором в соответствии с кондициями было выделено два промышленных типа руд: сплошные и вкрапленные. В результате схема предусматривала возможное объединение вкрапленных руд с аналогичными рудами Норильского месторождения и переработку сплошных на обогатительной фабрике со складированием пирротинового концентрата.

Детальное изучение сплошных руд, выявившее три резко различающихся по составу и структуре природных типа, привело к необходимости пересмотра технологической схемы и переходу к селективному обогащению отдельных типов руд. Организация селективной переработки требует создания эффективной технологии производства горных работ с минимальными потерями и разубоживанием руды, организации ее селективной выдачи по транспортным и подъемным тракам на поверхность, т. е. некоторых дополнительных капитальных затрат. Себестоимость добычи руды на участке возрастает при этом на 3 %, а переработки тонны руды — на 20 %. Однако за счет роста извлечения металлов в обогатительном и металлургическом цикле производства в целом достигается экономический эффект в сумме около 1 млн руб. в год, что обеспечивает окупаемость дополнительных капитальных затрат за 3—4 года.

Таким образом, раздельная добыча и переработка выделенных типов богатых медно-никелевых руд при некотором

ухудшении показателей добычи и обогащения обеспечила высокую конечную народнохозяйственную эффективность за счет повышения степени комплексности использования сырья.

§ 2. Характеристика объекта исследования.

Конкретизация постановки задачи

В качестве основных объектов исследования выступали процессы обогащения медно-никелевых руд Норильского горно-металлургического комбината и вольфраммолибденовых руд Тырныаузского ГМК*.

Процесс освоения месторождения до получения металла можно разделить на ряд последовательных стадий. Эта последовательность в укрупненном виде связана с производственными циклами: промышленной разведкой месторождения, добычей, обогащением, металлургией. Каждый из этих циклов включает последовательный ряд операций и технологических аппаратов: транспортировку, подготовительные операции, основные технологические операции, отгрузку готовой продукции. Вся последовательность операций подчинена выпуску конечного продукта — металла.

Поскольку ряды цветных металлов в основном являются полиметаллическими, то, как правило, горно-металлургические предприятия ориентированы на одновременный выпуск нескольких конечных продуктов. В частности, на Норильском горно-металлургическом комбинате производится медь, никель, сера и др.

Анализ схем обогащения медно-никелевых руд позволяет конкретизировать общую постановку задачи управления качеством руд. Выделяются три типа взаимосвязанных задач.

1. Прогнозирование природных и технологических типов руд по данным химического экспресс-анализа. Руды месторождений цветных металлов, как правило, неоднородны. Технологическая оценка руд в настоящее время базируется в основном на результатах лабораторных и полупромышленных испытаний отдельных проб, что не обеспечивает получения необходимой информации о качестве руд, увеличивает объем и стоимость опробования и не избавляет обогатительные фабрики от недостатков и срывов в работе.

* Исследование проводилось совместно с научными сотрудниками МНТК Механобр (г. Ленинград) В. М. Изюитко и А. И. Топоровским.

Такая оценка совершенно недостоверна для труднообогатимых руд, показатели переработки которых слабо зависят от содержания металлов в руде. Для выделения природных типов руд, характеризующихся устойчивыми показателями качества (а следовательно, и технологическими характеристиками), могут быть применены методы многомерной классификации по химическому составу.

Используя методы классификации для изучения и прогнозирования типологии руд, поступающих на обогащение, можно организовать их раздельную переработку, ориентированную на учет особенностей каждого типа. Это позволит повысить качественные показатели обогатительного передела за счет более полного извлечения полезных компонентов.

2. Прогнозирование технико-экономических показателей процессов обогащения различных природных типов руд. Для определения оптимальной глубины обогащения на отдельных стадиях переработки руды и решения проблемы управления процессами рудоподготовки и флотации необходимо исследование взаимосвязей характеристик качества руды с технико-экономическими показателями обогащения. Изучив основные типы руд, поступающие на обогатительную фабрику, следует провести комплексный анализ влияния показателей качества руды на выходные показатели обогатительного передела.

Вследствие того, что руда, поступающая на обогатительную фабрику, не является однородной, зависимость показателей обогащения от качества руд может быть достаточно сложной.

Один из возможных путей построения моделей для таких структурно-неоднородных совокупностей — аппроксимация реальной зависимости некоторой кусочно-линейной поверхностью.

3. Выбор оптимальных режимов обогащения с позиции конечных результатов горно-металлургического предприятия. При переработке руды определенного качества можно получать существенно разные технологические показатели обогащения (т. е. качество концентратов и извлечение в них металлов). Выбор наилучшего режима обогащения должен, очевидно, осуществляться по определенному критерию оптимальности. Разумно предположить, что на практике могут встретиться различные ситуации, требующие выбора определенных критериев оптимальности. Например, при складывающемся дефиците мощностей по выпуску меди можно выбирать режим, дающий наиболее богатый медный концентрат, при ограничениях по качеству никелевого концентрата.

При осложнении ситуации с выполнением плана производства по никелю можно идти на получение наиболее богатого никелевого концентрата, накладывая ограничения на качество медного и пирротинового концентратов.

В общем случае может возникнуть ситуация, когда критерием оптимальности становится максимизация расчетной прибыли предприятия, определяемой как разница между стоимостью выпуска готовых металлов (из определенного объема руды) и затратами на его производство в обогащательно-металлургическом цикле.

Очевидно, что выбор оптимального режима должен базироваться на модели ситуационного анализа процесса обогащения. Наиболее удобно для таких целей применять имитационные статистические модели. При их конструировании используются результаты решения задач 1 и 2, различного рода соотношения по балансу металлов и концентратов, а также основные затратные и ценностные характеристики горно-металлургического передела.

§ 3. Выделение и прогнозирование природных и технологических типов руд

Объектом исследования выступали данные химических анализов 200 проб основных типов руд медно-никелевого месторождения. Обучающая выборка по типам руд имела следующее распределение: 70 проб составляли кубанитовые руды (35 %); 52 пробы — пирротиновые руды (26 %); 46 проб — халькопиритовые (23 %); 32 пробы — кубанит-пирротиновые руды (16 %). Таким образом, обучающая выборка достаточно хорошо представлена основными типами руд изучаемого месторождения.

Каждая проба характеризовалась 13 признаками, отражающими содержание в руде различных химических элементов:

- x_1 — содержание никеля;
- x_2 — содержание меди;
- x_3 — содержание кобальта;
- x_4 — содержание суммы платиноидов;
- x_5 — содержание платины;
- x_6 — содержание палладия;
- x_7 — содержание золота;
- x_8 — содержание серы;
- x_9 — отношение содержания меди к содержанию никеля;
- x_{10} — отношение содержания кобальта к содержанию палладия;
- x_{11} — отношение содержания платины к содержанию палладия;
- x_{12} — отношение содержания меди к содержанию серы;
- x_{13} — отношение суммы содержания меди и никеля к содержанию серы.

При выборе признаков для многомерной классификации необходимо руководствоваться следующими предпосылками:

- 1) признаки должны быть относительно независимыми;
- 2) в области изменения классификационные признаки должны обладать значительной вариацией;
- 3) при сокращении набора параметров должно теряться как можно меньше информации об изучаемой выборке;
- 4) для оперативного управления процессом обогащения руды признаки должны сравнительно просто определяться экспрессными методами.

Анализ корреляционных связей признаков (табл. 8.1) позволяет сделать вывод о сильной мультиколлинеарности рассматриваемых характеристик.

Принимая во внимание перечисленные выше положения, учитываемые при выборе классификационных характеристик, было решено воспользоваться для классификации совокупности признаком x_9 — отношением содержания меди к содержанию никеля. В табл. 8.2 приведены варианты классификации выборки по данному признаку*.

По результатам классификации видно, что довольно устойчиво выделяются халькопиритовые руды, особенно два подтипа этих руд, отличающиеся в основном содержанием золота.

Четкого выделения кубанитовых, пирротиновых и кубанит-пирротиновых руд по данному признаку не происходит. Такая ситуация не является удовлетворительной для управления качеством руд, поступающих на обогащение. Поэтому были предприняты попытки отыскать набор классификационных признаков, позволяющих устойчиво выделять указанные типы руд.

Анализируя полученные по признаку x_9 классификации можно отметить, что наиболее варьирующим является параметр x_7 — содержание в руде золота. В качестве второго классификационного признака можно выбрать x_{13} — отношение суммы содержания меди и никеля к содержанию серы. Эти признаки относительно независимы и тесно связаны со всеми остальными признаками. И хотя параметр x_7 не может быть определен экспрессными методами, привлечение его в качестве типобразующего является целесообразным, поскольку получающиеся типологии являются достаточно устойчивыми (табл. 8.3).

* Классификация проводилась по алгоритму, разработанному в ИЭиОПН СО АН СССР и описанному в работе [Розин и др., 1984].

Коэффициенты корреляции параметров химического состава руд медно-никелевого месторождения

	x_1	x_2	x	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
x_1	1	-0,40	0,73	-0,32	-0,25	-0,33	-0,42	0,46	-0,62	0,06	0,01	-0,49	-0,44
x_2		1	-0,70	0,79	0,73	0,79	0,71	0,15	0,88	-0,65	0,20	0,85	0,93
x_3			1	-0,55	-0,51	-0,55	-0,58	0,29	-0,80	0,70	-0,16	-0,68	-0,75
x_4				1	0,93	0,99	0,81	0,23	0,73	-0,52	0,20	0,65	0,70
x_5					1	0,89	0,77	0,17	0,65	-0,52	0,46	0,60	0,66
x_6						1	0,80	0,24	0,74	-0,51	0,13	0,65	0,70
x_7							1	0,11	0,70	-0,47	0,17	0,62	0,64
x_8								1	-0,02	-0,10	-0,13	-0,08	-0,09
x_9									1	-0,53	0,13	0,86	0,91
x_{10}										1	-0,26	-0,47	-0,61
x_{11}											1	0,14	0,24
x_{12}												1	0,90
x_{13}													1

Таблица 8.2

Результаты классификации руд медно-никелевого месторождения по признаку x_9 ($\frac{Cu}{Ni}$)

Клас-сы	Распределение объектов по классам и типам руд для разных вариантов классификации *					
	I вариант		II вариант		III вариант	
	Число объектов в классе	Типы руд	Число объектов в классе	Типы руд	Число объектов в классе	Типы руд
1	41	Халькопиритовые (82 %), кубанитовые (9 %), кубанит-пирротиновые (9 %)	41	Халькопиритовые (82 %), кубанитовые (9 %), кубанит-пирротиновые (9 %)	10	Халькопиритовые (80 %), кубанитовые (10 %), кубанит-пирротиновые (10 %)
2	22	Халькопиритовые (100 %)	22	Халькопиритовые (100 %)	51	Кубанитовые (27 %), халькопиритовые (71 %), кубанит-пирротиновые (2 %)
3	12	Халькопиритовые (83 %), кубанитовые (17 %)	29	Кубанитовые (50 %), халькопиритовые (48 %), кубанит-пирротиновые (2 %)	138	Кубанитовые (40 %), пирротиновые (38 %), кубанит-пирротиновые (20 %), халькопиритовые (2 %)
4	46	Кубанитовые (69 %), халькопиритовые (25 %), кубанит-пирротиновые (6 %)	438	Кубанитовые (40 %), пирротиновые (38 %), кубанит-пирротиновые (20 %), халькопиритовые (2 %)	—	—
5	44	Кубанитовые (82 %), кубанит-пирротиновые (18 %)	—	—	—	—
6	61	Кубанитовые (33 %), пирротиновые (31 %), кубанит-пирротиновые (36 %)	—	—	—	—
7	34	Пирротиновые (97 %), халькопиритовые (3 %)	—	—	—	—

* Варианты различаются значениями внутренних параметров алгоритма классификации.

Таблица 8.3

Результаты классификации руд медно-никелевого месторождения по признакам x_7, x_{13} *

Распределение объектов по классам и типам руд для разных вариантов классификации				
Классы	I вариант		II вариант	
	Число объектов в классе	Тип руд	Число объектов в классе	Тип руд
1	19	Халькопиритовые (100 %)	24	Халькопиритовые (100 %)
2	13	Халькопиритовые (84 %), кубанитовые (16 %)	15	Халькопиритовые (86 %), кубанитовые (14 %)
3	29	Кубанитовые (76 %), халькопиритовые (20 %), кубанит-пирротиновые (4 %)	108	Кубанитовые (60 %), пирротиновые (9 %), кубанит-пирротиновые (25 %), халькопиритовые (6 %)
4	81	Кубанитовые (53 %), кубанит-пирротиновые (33 %), пирротиновые (14 %)	44	Пирротиновые (95 %), кубанит-пирротиновые (5 %)
5	41	Пирротиновые (98 %), кубанит-пирротиновые (2 %)		

* 1) В таблице не приведены единичные и малочисленные классы;

2) Варианты I и II получены изменением управляющего параметра алгоритма классификации.

Помимо устойчивости классификации следует отметить и четкое выделение в ней пирротиновых руд. Халькопиритовые руды делятся на два стабильных подтипа, различающихся между собой содержаниями суммы платиноидов, палладия и золота.

Кубанитовые и кубанит-пирротиновые руды являются близкими по химическому составу и объединяются в один тип.

В полученных классах наблюдается и существенное уменьшение вариации не только классификационных признаков, но также и других параметров, не участвующих в классификации.

Наиболее сильно классы различаются между собой по следующим параметрам: содержанию в руде меди, суммы платиноидов, платины, палладия, золота, отношению содержания меди к содержанию никеля; отношению суммы содержания меди и никеля к содержанию серы.

Интерпретация компонент (пирротиновые руды медно-никелевого месторождения)

Признак	Компоненты			
	I	II	III	IV
Никель	0,29	0,75	0,26	0,02
Медь	0,92	0,99	-0,09	0,11
Кобальт	-0,16	0,34	0,01	0,01
Сумма платиноидов	0,94	0,01	0,07	0,16
Платина	0,93	-0,14	0,09	-0,11
Палладий	0,88	0,05	-0,08	0,10
Золото	0,05	-0,41	0,22	-0,49
Сера	0,13	0,50	0,50	-0,30
Медь : никель	0,86	-0,22	-0,24	0,13
Кобальт : никель	-0,61	-0,01	-0,29	0,18
Платина : палладий	0,44	-0,38	-0,29	-0,38
Медь : сера	0,09	-0,29	0,61	0,69
(Медь + никель) : сера	0,73	0,22	-0,42	-0,10
Дисперсия, %	41,19	11,18	9,04	8,15

Для классификации руд, получения объективных выводов относительно их петрохимической близости (различия) и возможности экспрессного распознавания по минимальному набору легко определяемых показателей использован также метод главных компонент, являющийся модификацией факторного анализа.

С помощью данного метода можно выделить наиболее существенные главные компоненты (факторы), оказывающие влияние на формирование облика изучаемой совокупности, и представить результаты наблюдений в виде их проекции на плоскость, снизив при этом размерность пространства исходных признаков с минимальными искажениями геометрической структуры совокупности наблюдений, что облегчает решение задачи классификации.

Полученные классы, соответствующие рудам разных типов, отличны по описывающим их характеристикам, являются устойчивыми и, следовательно, отражают объективно существующие различия между рудами. Параметры однородных классов могут выступать как некоторые «эталоны» при классификации руды, поступающей на обогащение.

Классификация сплошных руд медно-никелевого месторождения была осуществлена с учетом количественного соотношения основных рудных минералов: пирротина, пентландита, халькопирита, кубанита и магнетита. При этом четко выделились пирротиновые, кубанитовые и халькопиритовые руды (табл. 8.4). Кубанитсодержащие пирротино-

вые руды не имеют резкой границы с пирротиновыми и, как и в рудных телах, отделяются от них достаточно условно. Результаты использования метода главных компонент подтвердили результаты, полученные методами многомерной классификации.

Как показано выше, природные типы одновременно являются технологическими, поэтому их классификация полностью отвечает практическим требованиям.

§ 4. Прогнозирование техничко-экономических показателей процессов обогащения (случай раздельной переработки природных типов руд)

Анализ результатов обогащения руд различных месторождений показал, что выбор технологической схемы их переработки и успешность ее применения во многом зависят от минерального и химического состава руд, их структурно-текстурных особенностей и физико-механических свойств. Так, измельчаемость руд и их флотуемость определяются, главным образом, минеральным составом, степень раскрытия рудных зерен связана с их размерами, характером срастания и т. д.

Несмотря на многообразие геолого-минералогических факторов, влияющих на результаты обогащения, они могут быть объединены в две группы: 1) факторы, непосредственно влияющие на поведение руд в процессе переработки: свойства главных рудных минералов (цвет, форма и размеры кристаллов, присутствие элементов-примесей, количество генераций и модификаций и т. д.); особенности парагенетических ассоциаций минералов; текстуры и структуры руд; физико-механические свойства руд и т. д.; 2) факторы, опосредованно проявляющиеся через факторы первой группы: расстояние до интрузивного массива и форма его контактов; интенсивность тектонической деятельности; величина и характер разубоживания и т. д.

Главными процессами обогащения, охватывающими практически все многообразие месторождений, являются флотация, гравитация и предшествующее им дробление и измельчение руд. Целью первых двух процессов является «раскрытие» рудных минералов, т. е. высвобождение их из сростков с нерудными, а двух последних — целенаправленное отделе-

ние (извлечение) того или иного рудного минерала в индивидуальный или коллективный концентраты.

При этом для флотации используется различие рудных и нерудных минералов по степени смачиваемости поверхности водой, а гравитационное обогащение основано на расслоении зерен рудных минералов по плотности и крупности.

Влияние факторов каждой группы на технологические показатели меняется в зависимости от генетического типа месторождения, принятой технологической схемы и различно для каждого технологического процесса (табл. 8.5).

Первая группа факторов, непосредственно влияющих на обогащение, характеризует основные особенности руд, которые в настоящее время принято называть типоморфными, т. е. зависящими от конкретных условий образования минералов и руд как парагенетических ассоциаций этих минералов.

Среди типоморфных свойств, важных для технологической переработки, можно выделить два вида:

позволяющие разделять минералы и являющиеся основой создания технологических процессов и схем (цвет, плотность, электрические, магнитные и другие свойства);

влияющие на показатели переработки руд по технологическим схемам (наличие генераций и модификаций минералов, габитус кристаллов, особенности их структуры, наличие примесей и т. д.).

Между выделенными типами не всегда существует четкое различие. Так, форма и размеры агрегатов учитываются при создании схем и одновременно влияют на технологические показатели.

Количественные зависимости между геолого-минералогическими и технологическими особенностями руд могут оцениваться разными методами, целью которых является установление возможности и надежности технологической оценки по уравнениям, графикам или только по данным технологических проб, что определяет в конечном итоге стоимость этой оценки.

Составление прогнозных зависимостей для всех типов руд дает возможность оценить технологический тип месторождения или его части (участка, рудного тела, типа руды) и отнести его руды к легко-, труднообогатимым или рядовым (промежуточный случай).

Исследование указанных связей между геолого-минералогическими факторами и технологическими показателями позволяет не только характеризовать руду, но и выбрать

Геолого-минералогические факторы, влияющие на переработку руд

Группа факторов	Фактор	Процесс						
		Добыча	Выбор способа переработки	Складирование	Транспортировка	Выбор способа сепарации	Дробление, измельчение	Флотация
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Непосредственно влияющие на процесс переработки руд	Минеральный состав							
	Соотношение минералов	+	+	+				
	Состав главных рудных минералов		+		+	+	+	+
	Кристаллографические формы и размеры индивидов		+		+	+	+	+
	Структура граней						+	+
	Наличие элементов-примесей					+		+
	Изоморфизм							+
	Дефектность, политипия, степень упорядоченности						+	+
	Особенности роста, зональность, структура распада						+	+
	Физические свойства минералов (плотность, электрические и магнитные свойства и т. д.)	+	+	+	+	+	+	+
	Наличие контрастных и близких по свойствам минералов		+			+	+	+
	Поверхностная активность		+	+		+	+	+
	Степень окисленности		+	+	+	+	+	+
	Химический состав							
	Соотношение рудных и породобразующих, полезных и вредных компонентов	+	+	+	+	+	+	+
Особенности распределения полезных компонентов	+	+			+	+	+	
Присутствие окисленных форм	+	+	+	+	+	+	+	
Присутствие химически активных соединений		+					+	
Структурно-текстурные особенности								
Форма и размеры зерен		+		+	+	+	+	
Характер границ и сростаний		+		+	+	+	+	
Степень однородности строения					+	+	+	
Наличие включений					+	+	+	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2. Влияющие через факторы первой группы	Физико-механические свойства							
	Крепость	+	+	+	+		+	
	Плотность	+	+	+	+		+	
	Способность к опламыванию	+	+	+	+		+	+
	Пористость	+	+	+	+		+	+
	Влажность, влагоемкость	+	+	+	+		+	
	Угол внутреннего трения	+		+	+			
	Электрические свойства (удельное сопротивление, электропроводность)			+			+	
	Магнитные свойства (магнитная восприимчивость)			+			+	
	Степень контрастности свойств		+				+	+
	Геологическая характеристика							
	Литологическая характеристика вмещающих и оруденелых пород	+	+	+	+	+	+	+
	Магматизм	+	+				+	+
	Тектоника	+	+	+	+	+	+	+
	Метаморфические и метасоматические изменения горных пород	+	+			+	+	+
Форма и размеры рудных тел	+		+	+				
Степень размерности оруденения	+	+	+	+	+	+	+	
Количество природных типов	+	+			+	+	+	
Стадийность минералообразования		+			+	+	+	
Наличие зональности	+	+			+	+	+	
Соотношение гипсо- и гипергенных процессов	+	+	+	+	+	+	+	

для ее переработки соответствующую технологическую схему.

Прогнозные оценки проверяются показателями работы обогатительной фабрики. При хорошей сходимости прогнозных и фактических показателей переработки прогнозирования извлечения и качества концентрата становится основой текущего и перспективного планирования работы фабрики, управления качеством руды и горно-металлургического предприятия в целом.

Для решения задачи прогнозирования технико-экономических показателей обогащения была изучена отчетная информация по показателям обогащения сплошных сульфид-

ных руд на двух секциях обогатительной фабрики. Первичными данными являлись содержание меди и никеля в питании и продуктах обогащения, ситовый анализ питания, расход основных реагентов. Данные по выходам продуктов обогащения и извлечения металлов получены расчетным путем с помощью уравнений материального баланса.

Статистическая выборка при изучении взаимосвязей технико-экономических показателей по одной из секции состояла из 315 сменных проб. За исследуемый период секция характеризовалась устойчивой работой; на ее вход поступала руда со сравнительно небольшой вариацией качества (коэффициенты вариации для содержания в руде никеля и меди порядка 4 и 13 % соответственно); не происходило изменений в технологической схеме переработки руды.

Помимо основных параметров, характеризующих качество руды, готовых концентратов — содержание основных металлов в питании и продуктах обогащения — одним из важнейших параметров технологии обогащения является измельчение, имеющее целью подготовку руды непосредственно к разделению. Степень измельчения определяется ситовым анализом, показывающим относительное содержание классов различной крупности в измельченной руде. Повышение степени измельчения способствует более полному раскрытию рудных минералов и отделению их от сростков с породными минералами. Однако при повышении степени измельчения после известных пределов рудные минералы могут переизмельчаться и ошламовываться. Следовательно, со степенью измельчения должна быть связана величина извлечения полезного компонента в концентрат. Это обстоятельство побудило включить этот параметр в исследование.

Основными статьями затрат на флотационных обогатительных фабриках являются затраты на вспомогательные материалы. Это обусловлено в основном значительной номенклатурой применяемых флотореагентов. Оптимальный реагентный режим служит главным средством улучшения технико-экономических показателей обогащения. В настоящем исследовании в состав основных реагентов, применяемых в технологии обогащения, включены расход аэрофлота и СФК.

В табл. 8.6 приведены статистические характеристики изучаемых параметров.

Следующим шагом статистического исследования выборочных данных является установление связи между показателями извлечения полезных компонентов в продукт обогащения с качеством продукта обогащения, качеством руды

Т а б л и ц а 8.6

Статистические характеристики параметров работы обогатительной фабрики

Параметр	Обозначение	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %
1	2	3	4	5
Содержание в руде, % никеля	α_{Ni}	2,65	0,41	4,15
меди	α_{Cu}	8,18	1,04	12,71
Содержание в никелевом концентрате				
никеля	β_{Ni}^{Ni}	5,61	0,43	7,66
меди	β_{Ni}^{Cu}	2,76	0,87	31,52
Содержание в медном концентрате, %				
никеля	β_{Cu}^{Ni}	1,65	0,20	12,12
меди	β_{Cu}^{Cu}	21,06	1,18	5,60
Содержание в пирротиновом концентрате, %				
никеля	β_{Po}^{Ni}	1,79	0,27	15,08
меди	β_{Po}^{Cu}	0,67	0,24	35,82
Ситовый анализ, % класса $\varnothing 74$ мк	s	73,38	5,72	7,80
Раход пеногасителя типа аэрофлот	P_A	101,97	31,57	30,96
СФК	P_C	50,98	16,17	31,72
Выход концентрата, %				
медного	γ_{Cu}	34,39	5,06	14,71
никелевого	γ_{Ni}	24,07	5,66	23,51
пирротинового	γ_{Po}	41,53	6,69	16,11
Извлечение в медный концентрат				
меди	ε_{Cu}^{Cu}	88,26	4,29	4,86
никеля	ε_{Cu}^{Ni}	21,48	4,89	22,77
Извлечение в никелевый концентрат				
меди	ε_{Ni}^{Cu}	8,26	3,75	45,40
никеля	ε_{Ni}^{Ni}	50,09	8,68	17,33

Окончание табл. 8.6

1	2	3	4	5
Извлечение в пирротиновый концентрат				
меди	$\epsilon_{\text{Cu}}^{\text{Po}}$	3,48	1,53	43,97
никеля	$\epsilon_{\text{Ni}}^{\text{Po}}$	28,43	7,95	27,96

и выделенными основными параметрами технологического процесса.

Однородность выборочных данных, несущественность отличия одномерного распределения многих изучаемых параметров от закона нормального распределения позволяют в качестве отправной гипотезы использовать предположение о существовании линейной многофакторной зависимости между извлечением в концентрат и качеством руды, концентрата, технологическими характеристиками процесса.

На основании исследования матрицы парных взаимосвязей были отобраны допустимые наборы факторов для включения в линейную многофакторную регрессионную модель. В табл. 8.7 приведены окончательные варианты зависимостей, рекомендуемых для дальнейшей работы. Остановимся подробнее на их анализе.

Во-первых, наблюдается высокая адекватность изучаемой зависимости линейной форме связи. Коэффициент Фишера (F), на основании которого проверяется эта гипотеза, не только превосходит табличное значение критерия на 5%-м уровне значимости, но и превышает его более чем в десять раз. Последнее свидетельствует о том, что оцененное соотношение может с достаточной надежностью использоваться и для прогнозирования моделируемого показателя (извлечение в концентрат) в рассматриваемой области изменения показателей качества руды и концентрата.

Во-вторых, высока точность полученных моделей, характеризуемая коэффициентом детерминации R^2 и стандартной ошибкой регрессии $\sigma_{\text{ост}}$. Сравнение остаточной вариации показателя извлечения с его вариацией в исходной выборке позволяет утверждать, что включенные в модель факторы в основном и объясняют эти изменения.

В-третьих, для выборки не удалось установить скольконбудь заметного влияния (в смысле линейного эффекта) на извлечение таких технологических параметров обогащительного процесса, как измельчение (ситовый анализ) и до-

Таблица 8.7

Модели показателей извлечения мегаллов в концентраты

Показатель	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент Фишера F	Стандартная ошибка $\sigma_{\text{ост}}$	Коэффициенты регрессии (в числителе) и их стандартные ошибки (в знаменателе)		Содержание Ni		Свободный член
				Содержание Cu		Содержание Ni		
				в никелевом концентрате, $\epsilon_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$, %	в руде, $\alpha_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$, %	в руде, $\alpha_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$, %	в пирротиновом концентрате, $\beta_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$, %	
Извлечение Cu в никелевый концентрат, $\epsilon_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$, %	0,76	323,90	1,85	$\frac{3,30}{0,423}$	$\frac{-1,32}{0,403}$	$\frac{10,33}{0,943}$	—	-17,46
Извлечение Cu в пирротиновый концентрат, $\epsilon_{\text{Cu}}^{\text{Po}}$, %	0,45	86,50	1,14	$\frac{0,52}{0,077}$	$\frac{-0,46}{0,063}$	—	$\frac{2,86}{0,246}$	0,72
Извлечение Ni в медный концентрат, $\epsilon_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}$, %	0,91	780,33	1,48	$\frac{-1,15}{0,099}$	$\frac{2,74}{0,083}$	$\frac{-11,28}{0,757}$	—	8,29
Извлечение Cu в медный концентрат, $\epsilon_{\text{Cu}}^{\text{Cu}}$, %	0,81	440,9	1,88	$\frac{-4,08}{0,125}$	$\frac{1,75}{0,104}$	$\frac{-8,16}{0,957}$	—	106,83
Извлечение Ni в никелевый концентрат, $\epsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$, %	0,93	1448,9	2,25	—	—	$\frac{41,51}{1,149}$	$\frac{-24,51}{0,483}$	15,39
Извлечение Ni в пирротиновый концентрат, $\epsilon_{\text{Ni}}^{\text{Po}}$, %	0,89	841,9	2,64	—	$\frac{-2,661}{0,144}$	$\frac{-30,22}{1,339}$	$\frac{23,92}{0,555}$	87,55

Таблица 8.8

Изменение коэффициента детерминации

Параметр	Коэффициент детерминации R^2	Изменение коэффициента детерминации, %
Содержание Ni в пирротиновом концентрате	0,583	58,3
Содержание Ni в руде	0,771	18,7
Содержание Cu в руде	0,890	12,0
Расход реагента СФК	0,892	2,0
аэрофлот	0,893	1,0
Крупность	0,893	0,0

бавки флотореагентов (расход аэрофлота и СФК). При использовании модели шаговой регрессии эти факторы, как правило, вводятся на последних шагах процесса и их добавка к повышению качества модели практически несущественна. Изменение коэффициента детерминации в методе шаговой регрессии при моделировании показателя извлечения никеля в пирротиновый концентрат приведено в табл. 8.8.

Построенные модели могут использоваться в системах управления качеством руд в тех случаях, когда может быть организована селективная добыча и обогащение природных типов руд (задачи 1, 2).

Однако, несмотря на то, что технологические сорта руд часто бывают выделены и геометризованы, в работе действующих обогатительных фабрик нередко имеет место несоответствие между составом и свойствами планируемой и поступающей на фабрику шихты. Такое расхождение может быть вызвано разными причинами: сложными горно-техническими условиями отработки месторождения, одновременным вовлечением в переработку большого количества рудных тел при отсутствии усреднительных складов, неправильно выбранными для усреднения показателями качества руды, недостоверными сведениями о руде, положенными в основу планирования, и т. д. В этом случае возникает задача прогнозирования и управления процессом обогащения по экспрессным анализам шихты, находящейся в процессе обогащения. В отличие от рассмотренной ситуации, когда технологические свойства руды заранее оценены и идет переработка одного типа руд, здесь имеет место только некоторая временная устойчивость перерабатываемой смеси руд.

§ 5. Прогнозирование технико-экономических показателей процессов обогащения (случай переработки смешанных типов руд)

При управлении процессом флотации следует учитывать, что в ходе предшествующих операций (добыча, транспортировка, дробление, измельчение) руды претерпевают существенные изменения: одни минералы легко отделяются, а другие — концентрируются с образованием технологических минеральных ассоциаций, сохраняющих основные отличительные черты «материнских» природных типов.

На отдельных переделах минеральная смесь может также существенно отличаться от руды вследствие далеко не всегда одинаковых технологических воздействий. Поэтому на ряде переделов не удается использовать сведения об исходной руде, а приходится определять технологическую ассоциацию непосредственно в ходе технологического процесса для решения задач его оптимизации.

Рассмотрим классификацию руд в минеральной смеси с выделением так называемых технологических ассоциаций на примере Тырныаузской обогатительной фабрики для решения задач оптимизации технологического процесса. В связи с большим разнообразием минерального состава различается несколько рудных фракций, которые могут слагать полностью месторождения или их отдельные участки.

По составу исходных или вмещающих пород, минеральной форме локализации главных полезных компонентов и структурно-текстурным особенностям выделяются три группы руд: карбонатная, алюмосиликатная и промежуточная. Они, в свою очередь, делятся на типы, состав которых изменяется в зависимости от положения в пространстве, метасоматической колонке и рудном теле. Такая классификация руд подтверждена математической обработкой нескольких сотен данных о составе руд с помощью метода главных компонентов.

Для переработки комплексных руд вольфрама и молибдена применяется технологическая схема, в основу которой положена флотация — процесс, построенный на разнице в гидрофобности слагающих руду минералов. Эта схема для шеелитовых руд состоит из основной шеелитовой флотации и последующего передела по методу Петрова, заключающегося в пропарке черного шеелитового концентрата с жидким стеклом.

При большом количестве сульфидов в руде в схему включается предшествующая шеелитовой сульфидная флотация с целью отделения молибденита и других сульфидов в коллективный сульфидный концентрат, который подлежит дальнейшей селекции.

Роль минерального состава руд для разных переделов неодинакова: на шеелитовую флотацию влияет присутствие в руде близких по свойствам и резко ухудшающих качество концентрата кальцийсодержащих минералов (кальцита, флюорита, апатита), а также форма локализации вольфрама и содержащегося в нем молибдена.

Анализ показателей переработки выявил, что для руд разных тел и типов, образованных в неодинаковых условиях, факторы, влияющие на обогатимость, различны.

Результаты исследования технологических проб Тырне-аузского месторождения, описываемых четырнадцатью параметрами химического состава и тремя технологическими параметрами, приведены в табл. 8.9. В ней использованы следующие обозначения:

$\beta_{Sch}^{WO_3}$ — содержание WO_3 в шеелитовом концентрате;

$\epsilon_{Sch}^{WO_3}$ — извлечение WO_3 в шеелитовый концентрат.

Анализ моделей прогнозирования технологических показателей (табл. 8.9) свидетельствует о существенном улучшении характеристик точности кусочно-линейной регрессии по сравнению с моделью для всей совокупности. Во всех классах существенно уменьшается средняя относительная ошибка прогноза (по показателю $\beta_{Sch}^{WO_3}$ от 1,6 до 11 раз, а по показателю $\epsilon_{Sch}^{WO_3}$ от 2 до 5 раз).

В классах изменяется структура влияния факторов на моделируемый показатель. Так, показатель $\beta_{Sch}^{WO_3}$ в общей совокупности определяется содержанием WO_3 в руде и CaF_2 , а в классе, состоящем преимущественно из скарнов, — WO_3 и SiO_2 . Показатель извлечения $\epsilon_{Sch}^{WO_3}$ в общей совокупности определяется содержанием в руде WO_3 и $Fe_{общ}$, в классе скарнов — содержанием в руде CaO и $Fe_{общ}$, а в классе плагиогранит-порфиров — содержанием в руде WO_3 и Al_2O_3 .

Как следует из системы построенных зависимостей, качество шихты оказывает существенное влияние на выбор технологической схемы обогащения и на технико-экономические показатели. В процессе обогащения происходит изменение состава руд, так как одни минералы легко отделя-

Таблица 8.9

Регрессионные уравнения для прогнозирования технологических показателей

Типы руд	Технологический показатель	Уравнения регрессии	Коэффициент детерминации	Критерий Фишера		Средняя относительная ошибка прогноза, %
				$F_{расч}$	$F_{табл}$ при $\alpha=0,05$	
Общая совокупность технологических типов	$\beta_{Sch}^{WO_3}$	$9,71WO_3 - 0,47CaF_2 + 0,15$	0,93	310,5	3,45	98,8
	$\epsilon_{Sch}^{WO_3}$	$9,04WO_3 + 4,41 + Fe_{общ} + 66,38$	0,34	42,81	3,45	40,9
Плагиогранит-порфиры	$\beta_{Sch}^{WO_3}$	$43,46WO_3 - 0,8CaF_2 + 0,28$	0,95	82,4	4,46	9,2
	$\epsilon_{Sch}^{WO_3}$	$154,61WO_3 - 2,31Al_2O_3 + 94,02$	0,66	7,64	4,46	4,9
Скарпированные мраморы	$\beta_{Sch}^{WO_3}$	$4,03WO_3 + 0,92Fe_{общ} - 0,28$	0,93	51,5	4,46	62,9
	$\epsilon_{Sch}^{WO_3}$	$-0,30CaCO_3 + 7,67MgO + 81,42$	0,95	66,7	4,74	2,4
Скарны	$\beta_{Sch}^{WO_3}$	$8,31WO_3 + 0,48SiO_2 - 8,30$	0,83	42,3	3,59	35,6
	$\epsilon_{Sch}^{WO_3}$	$4,45CaO + 2,71Fe_{общ} + 26,89$	0,50	5,59	3,98	3,7

П р и м е ч а н и е. Параметры уравнений регрессии представляют собой процентные содержания в руде соответствующих химических соединений.

Характеристика технологических ассоциаций

Технологические ассоциации	Состав, %										Качество проб			
	Химический					Минеральный					Уровень пены, см	h		
	CaCO ₃	CaF ₂	WO ₃	MO	MO/WO ₃	Al ₂ O ₃	Fe	Кальцит	Флюорит	Шеелит			Пироксен + амфибол	Биотит
Труднообогатимые	63,9	14,5	3,34	0,19	5,9	2,2	4,8	67	17	5	3	1	1	1
Рядовые	62,2	13,9	3,74	0,2	5,5	2,4	2,1	64	16	4	4	4	4	4
Легкообогатимые	59,4	13,7	4,87	0,2	4,4	3,6	3,0	62	15	3	6	5	5	2
												42,0	22,4	18
												47,0	24,0	51
												53,9	25,9	31

ются в хвосты, а другие, близкие по свойствам к шеелиту, проходят по всей технологической цепочке, в той или иной степени загрязняя концентраты. Таким образом, из природных типов, поступающих на фабрику в определенном соотношении, в питании цикла доводки образуются новые технологические ассоциации, характеризующиеся различной обогатимостью. Попытка классифицировать такие ассоциации (промпродукты) была сделана на основе информации о составе питания доводки (содержании минералов — кальцита, флюорита, шеелита, молибденита, пироксена, амфибола, биотита, кварца и сульфидов, а также основных компонентов: трехокси вольфрама, алюминия, серы и железа). Кроме того, измерялось содержание WO₃ в концентратах (β WO₃) и уровень пены (h), характеризующий типы перерабатываемых смесей и неучитываемые возмущения, создаваемые предыдущими циклами обогащения.

Результаты классификации по уровню пены позволили выделить три вида технологических ассоциаций: труднообогатимые, рядовые и легкообогатимые, а их изучение с учетом вещественного состава показало, что труднообогатимые ассоциации представляют собой продукт переработки руд существен-

Таблица 8.11

Корреляционная матрица *

Признаки	h	α WO ₃	β WO ₃	MO/WO ₃	CaCO ₃	CaF ₂	Al ₂ O ₃	Fe	Пироксен + амфибол	Биотит
h	1	<u>0,32</u>	-0,04	<u>-0,21</u>	-0,1	-0,13	<u>0,22</u>	0,19	<u>0,32</u>	-0,15
α WO ₃		1	<u>0,46</u>	<u>-0,61</u>	<u>-0,51</u>	<u>0,2</u>	<u>0,32</u>	<u>0,40</u>	<u>0,24</u>	<u>-0,34</u>
β WO ₃			1	<u>-0,2</u>	<u>-0,28</u>	<u>0,36</u>	-0,08	0,04	0,07	<u>-0,26</u>
MO/WO ₃				1	<u>0,43</u>	0,09	<u>-0,36</u>	<u>-0,46</u>	<u>-0,22</u>	0,09
CaCO ₃					1	0,01	<u>-0,44</u>	<u>-0,55</u>	<u>-0,53</u>	0,19
CaF ₂						1	<u>-0,32</u>	<u>-0,38</u>	<u>-0,39</u>	-0,08
Fe							1	<u>0,58</u>	<u>0,41</u>	-0,07
Пироксен + амфибол								1	<u>0,53</u>	<u>-0,23</u>
Биотит									1	<u>-0,24</u>
										1

* Подчеркнуты коэффициенты корреляции, значимые на 5%-м уровне.

но карбонатного состава, легкообогатимые — продукт обогащения руд с преобладанием алюмосиликатов, а рядовые — шихту алюмосиликатов и карбонатов.

Таким образом, видно, что даже подвергнутые существенной переработке руды сохраняют основную особенность: четкое разделение по свойствам на карбонатную, алюмосиликатную и промежуточные группы (табл. 8.10). Однако для оперативного распознавания групп необходимо иметь такой набор признаков, которые определялись бы экспрессными методами либо с помощью автоматических датчиков. Результаты расчета парных коэффициентов корреляции (табл. 8.11), а также генетическая связь содержания железа

с другими компонентами в природных типах руд (прямая — с алюмосиликатами и обратная — с кальцитом и флюоритом) позволили сократить число признаков классификации до трех (содержание в руде трехокси вольфрама ($\alpha_{\text{W}\text{O}_3}$), железа (α_{Fe}), уровень пены (h)). Эти признаки обеспечивают возможность с помощью соответствующих приборов и средств вычислительной техники осуществлять оперативное распознавание поступающих смесей.

На основе полученной классификации определены математические модели и рассчитана корреляционная матрица параметров процесса доводки, причем коэффициенты математических моделей по выделенным группам существенно различны, а модели более информативны, чем результаты идентификации, проведенной для всей массы руд.

§ 6. Выбор рациональных режимов обогащения с позиций конечной эффективности горно-металлургического производства

(на примере Норильского горно-металлургического комбината)

Для решения указанной проблемы используются имитационные статистические модели ситуационного анализа производственного процесса на горно-металлургическом комбинате. Для их построения использованы результаты статистического моделирования и прогнозирования природных и технологических типов руд (см. § 3) и показателей процесса обогащения руд (см. § 4, 5), а также данные балансов металлов и концентратов в обогащении и расчетные технико-экономические показатели металлургического передела Норильского горно-металлургического комбината.

Имитационная часть модели технико-экономических показателей обогащения может быть представлена балансовой матрицей (табл. 8.12).

Модель содержит 26 переменных. Входными являются параметры, характеризующие руду, поступающую на обогащающую секцию: объем руды (Q), содержание в перерабатываемой руде никеля и меди (α_{Ni} , α_{Cu}). К входным относится также параметр, характеризующий качество одного из концентратов. В рассматриваемой модели это содержание никеля в медном концентрате ($\beta_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$). Оставшиеся 22 параметра являются производными и вычисляются на основе установленных статистических зависимостей между

Таблица 8.12

Баланс металлов и концентратов на обогащающей фабрике, %

Продукт	Никель				Медь		
	Выход	Содержание	Выход	Извлечение	Содержание	Выход	Извлечение
Руда	Q	α_{Ni}	q_{p}^{Ni}	—	α_{Cu}	q_{p}^{Cu}	—
Медный концентрат	Q_1	$\beta_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$	$q_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$	$\varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$	$\beta_{\text{Cu}}^{\text{Cu}}$	$q_{\text{Cu}}^{\text{Cu}}$	$\varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Cu}}$
Никелевый концентрат	Q_2	$\beta_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$	$q_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$	$\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$	$\beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}$	$q_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}$	$\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}$
Пирротинный концентрат	Q_3	$\beta_{\text{PO}}^{\text{Ni}}$	$q_{\text{PO}}^{\text{Ni}}$	$\varepsilon_{\text{PO}}^{\text{Ni}}$	$\beta_{\text{PO}}^{\text{Cu}}$	$q_{\text{PO}}^{\text{Cu}}$	$\varepsilon_{\text{PO}}^{\text{Cu}}$

параметрами руды и концентратов, балансовых соотношений и теоретических зависимостей.

Остановимся более подробно на процедуре вычисления элементов балансовой матрицы.

Исходя из очевидных балансовых соотношений по основным извлекаемым металлам можно записать

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} + \varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Cu}} + \varepsilon_{\text{PO}}^{\text{Ni}} &= 100, \\ \varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Cu}} + \varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + \varepsilon_{\text{PO}}^{\text{Cu}} &= 100. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Воспользуемся регрессионными зависимостями извлечения металлов в соответствующие концентраты от параметров качества исходной руды и качества концентратов, приведенными ранее.

Извлечение меди:

в никелевый концентрат — $a_0^1 + a_1^1 \beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + a_2^1 \alpha_{\text{Cu}} + a_3^1 \alpha_{\text{Ni}}$;
в пирротинный концентрат — $a_0^2 + a_1^2 \beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + a_2^2 \alpha_{\text{Cu}} + a_4^2 \beta_{\text{PO}}^{\text{Ni}}$;
в медный концентрат — $a_0^3 + a_1^3 \beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + a_2^3 \alpha_{\text{Cu}} + a_3^3 \alpha_{\text{Ni}}$.

Извлечение никеля

в медный концентрат:

$$b_0^1 + b_1^1 \beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + b_2^1 \alpha_{\text{Cu}} + b_3^1 \alpha_{\text{Ni}} + b_4^1 \beta_{\text{Cu}}^{\text{Ni}};$$

в никелевый концентрат —

$$b_0^2 + b_2^2 \alpha_{\text{Ni}} + b_4^2 \beta_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} + b_5^2 \beta_{\text{PO}}^{\text{Ni}};$$

в пирротинный концентрат —

$$b_0^3 + b_2^3 \alpha_{\text{Cu}} + b_3^3 \alpha_{\text{Ni}} + b_5^3 \beta_{\text{PO}}^{\text{Ni}}.$$

Подставим эти соотношения в (8.1). Получим

$$\begin{aligned} & (a_0^1 + a_0^2 + a_0^3) + (a_1^1 + a_1^2 + a_1^3) \beta_{Ni}^{Cu} + (a_2^1 + a_2^2 + a_2^3) \alpha_{Cu} + \\ & \quad + (a_3^1 + a_3^3) \alpha_{Ni} + a_4^2 \cdot \beta_{Po}^{Ni} = 100; \\ & (b_0^1 + b_0^2 + b_0^3) + b_1^1 \beta_{Ni}^{Cu} + (b_2^1 + b_2^3) \alpha_{Cu} + (b_3^1 + b_3^2 + b_3^3) \alpha_{Ni} + \\ & \quad + (b_4^1 + b_4^2) \beta_{Cu}^{Ni} + (b_5^2 + b_5^3) \beta_{Po}^{Ni} = 100. \end{aligned}$$

Данную систему можно записать в следующем виде:

$$A_1 \beta_{Ni}^{Cu} + A_4 \beta_{Po}^{Ni} = A_0, \quad (8.2)$$

$$B_1 \beta_{Ni}^{Cu} + B_5 \beta_{Po}^{Ni} = B_0,$$

где

$$A_1 = a_1^1 + a_1^2 + a_1^3;$$

$$A_2 = a_2^1 + a_2^2 + a_2^3;$$

$$A_3 = a_3^1 + a_3^3;$$

$$A_4 = a_4^2;$$

$$A_0 = 100 - [(a_0^1 + a_0^2 + a_0^3) +$$

$$+ A_2 \alpha_{Cu} + A_3 \alpha_{Ni}];$$

$$B_1 = b_1^1;$$

$$B_2 = b_2^1 + b_2^3;$$

$$B_3 = b_3^1 + b_3^2 + b_3^3;$$

$$B_4 = b_4^1 + b_4^2;$$

$$B_5 = b_5^2 + b_5^3;$$

$$B_0 = 100 - [(b_0^1 + b_0^2 + b_0^3) + B_2 \alpha_{Cu} + B_3 \alpha_{Ni} + B_4 \beta_{Cu}^{Ni}].$$

Соотношение (8.2) представляет собой систему двух уравнений с двумя неизвестными (β_{Ni}^{Cu} , β_{Po}^{Ni}). Коэффициенты уравнений определяются коэффициентами регрессий, а также заданием входных параметров балансовой таблицы (параметры перерабатываемой руды α_{Ni} , α_{Cu} и качество концентрата β_{Cu}^{Ni}).

Система (8.2) линейно независима и имеет единственное решение

$$\beta_{Ni}^{Cu} = (A_0 B_5 - B_0 A_4) / (A_1 B_5 - B_1 A_4);$$

$$\beta_{Po}^{Ni} = (A_1 B_0 - B_1 A_0) / (A_1 B_5 - B_1 A_4).$$

Оставшиеся элементы балансовой матрицы определяются из

соотношений:

$$q_p^{Cu} = \alpha_{Cu} \cdot Q / 100;$$

$$q_{Cu}^{Cu} = \varepsilon_{Cu}^{Cu} \cdot q_p^{Cu} / 100;$$

$$q_{Ni}^{Cu} = \varepsilon_{Ni}^{Cu} \cdot q_p^{Cu} / 100;$$

$$q_{Po}^{Cu} = q_p^{Cu} - q_{Cu}^{Cu} - q_{Ni}^{Cu};$$

$$q_p^{Ni} = \alpha_{Ni} \cdot Q / 100;$$

$$Q_{Ni} = q_{Ni}^{Cu} \cdot 100 / \beta_{Ni}^{Cu};$$

$$q_{Cu}^{Ni} = \varepsilon_{Cu}^{Ni} \cdot q_p^{Ni} / 100;$$

$$Q_{Cu} = q_{Cu}^{Ni} \cdot 100 / \beta_{Cu}^{Ni};$$

$$\beta_{Cu}^{Cu} = q_{Cu}^{Cu} \cdot 100 / Q_{Cu};$$

$$Q_{Po} = Q - Q_{Cu} - Q_{Ni};$$

$$\beta_{Po}^{Cu} = q_{Po}^{Cu} \cdot 100 / Q_{Po};$$

$$q_{Po}^{Ni} = \beta_{Po}^{Ni} \cdot Q_{Po} / 100;$$

$$\varepsilon_{Po}^{Ni} = q_{Po}^{Ni} \cdot 100 / q_p^{Ni};$$

$$\varepsilon_{Po}^{Cu} = 100 - \varepsilon_{Ni}^{Cu} - \varepsilon_{Cu}^{Cu}.$$

Таким образом, задавая параметры исходного сырья и качество одного из концентратов (например, медного), можно получить взаимосогласованные варианты выпуска продукции обогатительного цикла. Изменяя входные параметры модели в пределах допустимых технологической схемой, можно получить зависимости извлечения полезных компонентов в обогатительном и металлургическом переделах, а также зависимость общего извлечения металла от качества концентрата.

Разработанный класс моделей ситуационного анализа и управления может использоваться в двух режимах: как инструмент оперативного управления и как инструмент выработки стратегических решений по наиболее рациональному извлечению полезных компонентов руды. Оба способа обеспечивают получение существенного экономического эффекта.

Анализ результатов обогащения руды, полученных с использованием имитационных моделей, показал, что экономика производства горно-металлургического комбината существенно зависит от принимаемых управленческих решений. Не следует, конечно, считать, что при отсутствии имитационных моделей управленческие решения не принима-

ются. Однако их последствия неявным образом выражаются в результатах производственной деятельности. О «цене» управленческих решений можно судить по следующим данным. При среднем извлечении, например, никеля в никелевый концентрат на уровне 64 % при принятии противоположных управленческих решений колебания извлечения составляют ± 5 % (абсолютных). С учетом разницы извлечения никеля из разноминерных концентратов (приблизительно 4 %) это означает, что изменение сквозного извлечения металла в зависимости от принимаемого решения составит примерно 0,5 %. В пересчете на конечную прибыль комбината это составляет несколько миллионов рублей.

Следует отметить, что это результат экономической деятельности предприятия. На уровне отрасли или народного хозяйства этот результат будет еще выше в связи с действием дополнительных факторов народнохозяйственного значения.

Поясним это подробнее. Прежде всего, оптовая цена на металл, по которой подсчитывается результат хозяйственной деятельности, не отражает ни уровня цен на мировом рынке, ни тем более их периодических колебаний. Во-вторых, в отрасли функционируют предприятия с существенно разным уровнем затрат на единицу получаемого металла, в том числе и предприятия с почти удвоенным по отношению к Норильскому горно-металлургическому комбинату (НГМК) уровнем затрат на единицу металла. При оптимальном управлении на уровне отрасли регулирование объема производства на таких предприятиях является источником дополнительной отраслевой и народнохозяйственной эффективности сверх хозрасчетного эффекта, получаемого непосредственно на управляемом предприятии.

С учетом масштабов НГМК отраслевой экономический результат также оказывается достаточно чувствителен к изменяемым на конкретном производстве комбината управленческим решениям. Это обстоятельство еще более усиливает свое действие в связи с тем, что дополнительное производство металла может быть использовано для снижения объемов горных работ на других предприятиях, где содержание металлов в руде в 5—8 раз ниже, чем на НГМК.

Расчеты, проведенные на имитационных моделях показывают, что они могут вскрыть значительные резервы повышения экономической эффективности производства. Например, при обогащении талнахитовых руд за счет загрубления медного концентрата может быть повышено общее извлечение никеля по комбинату с экономическим эффектом 4—5 млн руб. в год. Основным ограничением для реализации

этого варианта является наличие резервных мощностей по переработке медных концентратов.

При переработке кубанитовых руд эффект получается еще большим, но дополнительным условием является также наличие резервных мощностей по переработке никелевого концентрата. Для реализации такого эффекта тактикой оперативного управления должно являться повышение выхода медного концентрата при обогащении и наиболее полное использование мощностей по переработке медного концентрата.

Таким образом, примеры стратегических расчетов по имитационным моделям показывают возможность заметного повышения эффективности производства как непосредственно на НГМК, так и на отраслевом, и народнохозяйственном уровнях.

Кроме того, их использование на всех переделах обогащения может изменить тактику оперативного управления в соответствии со складывающейся производственной ситуацией, обеспечивая значительную экономическую эффективность.

Глава 9

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ КРУПНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

§ 1. Постановка задачи

Этапы исследования. В данной главе рассматривается случай, когда предприятие не имеет собственной сырьевой базы, а состав поставщиков сырья не является стабильным. При моделировании на предприятиях такого типа на первый план выходят задачи нахождения оптимальных технологических режимов в зависимости от характеристик качества сырья, а также задачи прогнозирования экономических показателей работы предприятий при изменениях поставок сырья из различных источников. Остановимся подробнее на последней задаче.

Сложность задачи обуславливает проведение нескольких этапов исследования. На первом этапе строится дескриптивная модель исследуемого производственного объекта. Используются как формальные методы, ведущее место среди которых занимают методы математической статистики, так и содержательный анализ. Проводится отбор существенных факторов, определяющих экономические и технико-экономи-

риантов, можно имитировать различные альтернативы изменения внешних условий функционирования предприятия и «проигрывать» на ЭВМ разные сценарии его развития, т. е. прогнозировать для производственного объекта последствия от принятия тех или иных решений о его развитии, схеме снабжения и т. п.

Характеристика объекта исследования. Экономико-статистическая модель строилась для доменного производства одного из металлургических комбинатов. В период исследования предприятие было оснащено современными доменными печами большого объема, непрерывно велись работы по совершенствованию технологии процесса, направленные на интенсификацию хода доменной печи и улучшение качества чугуна. В то же время имелись и сохраняются по сей день определенные трудности со снабжением комбината железорудным сырьем.

Во-первых, комбинат не имеет собственной стабильной железорудной базы. Основным поставщиком руды на комбинат является Коршуновский горно-обогатительный комбинат (ГОК), расположенный на севере Иркутской области. Кроме этого, руды и концентраты поставляются из северного Казахстана (Лисаковское и Соколовско-Сарбайское месторождения), а также незначительные количества руд других месторождений. Перечисленные руды являются сырьем для производства офлюсованного агломерата на аглофабрике комбината. Помимо собственного агломерата, в шихте доменной плавки используются неофлюсованные окатыши Лебединского ГОКа в Белгородской области, а также местное подготовленное сырье. В целом доля местной железорудной базы в снабжении комбината сырьем составляет 6—8 %.

Во-вторых, на комбинате существуют диспропорции между мощностями доменного и агломерационного производств. Аглоизвестковая фабрика обеспечивает лишь 75—80 % потребности доменных печей в подготовленном сырье. Завоз агломерата и окатышей со стороны приводит к многокомпонентности, нестабильности состава и качества шихты в доменном цехе.

Отдаленность поставщиков, перегруженность железных дорог ведут к неритмичному снабжению доменного цеха сырьем, а это, вместе с отсутствием необходимого уровня запасов и многокомпонентностью шихты, приводит к росту числа перешихтовок и нарушению постоянства состава и качества доменного сырья. В результате не соблюдаются

технологические требования, снижается производительность доменных печей, увеличиваются потери металла.

Наконец, в-третьих, качество железорудного сырья, поступающего на комбинат, имеет тенденцию к ухудшению. Это касается в первую очередь содержания железа в железорудной шихте и вызвано, главным образом, уменьшением поставок основного сырья — богатого железорудного концентрата Коршуновского ГОКа.

В силу рассмотренных причин совершенствование технологии доменного производства, интенсификация работы печей не приводят к росту объемов производства, а лишь позволяют поддерживать его на достигнутом уровне. В то же время на комбинате имеется возможность значительно (более чем на 10 %) увеличить на тех же мощностях выплавку чугуна. Для этого необходимо проведение некоторых технических мероприятий, прежде всего, улучшение снабжения комбината железорудным сырьем, развитие собственной сырьевой базы.

§ 2. Исследование влияния отдельных факторов на работу доменного производства

В первую очередь решалась задача анализа сложившихся тенденций изменения факторов производства и получения количественных оценок влияния характеристик железорудного сырья и технологических параметров аглоизвесткового и доменного производств на объем производства и себестоимость агломерата и чугуна на комбинате. Для этого использовалась ежемесячная информация о работе производств за пять лет. На основе анализа вариации факторов и парных коэффициентов корреляции между ними был проведен отсев факторов. В конечный набор включены следующие 54 фактора.

1. Доля коршуновского концентрата в железорудной части шихты для агломерации, %;
2. Цена металлошихты и основных материалов для агломерации на тонну агломерата, руб.;
3. Содержание железа в соколовско-сарбайской аглоруде, %;
4. Расход металлошихты на тонну агломерата, кг;
5. Расход флюсов на тонну агломерата, кг;
6. Расход твердого топлива на тонну агломерата, кг;
7. Среднее содержание железа в железорудном сырье, %;
8. Содержание железа в агломерате, %;
9. Доля фракций меньше 5 мм в агломерате, %;
10. Производительность агломашин, т/м² за 1 ч горячей работы;

11. Время капитальных и планово-предупредительных ремонтов в агломерации, % к календарному;
12. Время текущих простоев в агломерации, % к календарному;
13. Производство агломерата за календарные сутки; т;
14. Расходы по агломерационному переделу, руб;
15. Производственная себестоимость тонны агломерата, руб.;
16. Доля агломерата в железорудной части доменной шихты, %;
17. Доля окатышей в железорудной части доменной шихты, %;
18. Доля таштагольской доменной руды в железорудной части доменной шихты, %;
19. Расход металлошихты на тонну чугуна, кг;
20. Расход кокса скипового сухого и природного газа в пересчете на кокс на тонну чугуна, кг;
21. Среднее содержание железа в железорудной части доменной шихты, %;
22. Количество перешихтовок из-за отсутствия сырья (за месяц);
23. Остаток на начало месяца окатышей, тыс. т;
24. Остаток на начало месяца таштагольской доменной руды, тыс. т;
25. Цена металлошихты на тонну чугуна, руб.;
26. Себестоимость тонны кокса в пересчете на сухой, руб.;
27. Время текущих простоев в доменном цехе, % к календарному;
28. Тихий ход, % к календарному времени;
29. Потери железа (по разности), %;
30. Коэффициент использования полезного объема (КИПО) доменной печи;
31. Давление газа под колошником, МПа;
32. Температура дутья, °С;
33. Влажность дутья, %;
34. Содержание кислорода в дутье, %;
35. Себестоимость тонны чугуна, руб.;
36. Затраты по доменному переделу, руб./т;
37. Выпуск чугуна передельного в календарные сутки, т;
38. Расход коршунковского концентрата в среднем за сутки; т;
39. Расход соколовско-сарбайской аглоруды в среднем за сутки, т;
40. Расход лисаковского концентрата в среднем за сутки, т;
41. Расход прочего металлосырья на агломерацию в среднем за сутки, т;
42. Расход окатышей в среднем за сутки, т;
43. Расход таштагольской доменной руды в среднем за сутки, т;
44. Расход абатурского агломерата в среднем за сутки, т;
45. Содержание железа в коршунковском концентрате, %;
46. Содержание железа в лисаковском концентрате, %;
47. Содержание железа в прочем металлосырье для агломерации, %;
48. Содержание железа в окатышах, %;
49. Содержание железа в таштагольской доменной руде, %;
50. Содержание железа в абатурском агломерате, %;
51. Средняя цена прочего металлосырья для агломерации, руб.;
52. Доля лисаковского концентрата в металлошихте для агломерации, %;
53. Производство агломерата на комбинате в год, тыс. т;
54. Производство чугуна передельного в год, тыс. т.

Переменные обозначим через x_i , $i = \overline{1,54}$. Чтобы учесть и количественно отобразить тенденции изменения отдельных факторов во времени, в исследование был включен порядко-

вый номер месяца (x_{55}), корреляция с которым указывает на наличие или отсутствие определенной тенденции. Значимо отличающимися от нуля принимались коэффициенты парной корреляции $|r| > 0,255$ (уровень значимости равен 0,05). Рассмотрение начинается с выходных показателей доменного производства.

Из факторов, характеризующих работу доменного цеха, наиболее существенным является коэффициент использования полезного объема доменной печи. Он показывает, с какого объема доменной печи выплавляется тонна чугуна в сутки, и определяется отношением произведения объема печи V (в m^3) на число календарных суток D_n за вычетом времени простоя печи на капитальном ремонте t_n (сут) к количеству выплавленного за данный период чугуна Π (в перерыве на передельный):

$$\text{КИПО} = V(D_n - t_n)/\Pi \text{ м}^3/\text{т в сутки.}$$

В качестве основного стоимостного показателя выступает себестоимость тонны чугуна.

За исследуемый период для объема производства не наблюдалось сколько-нибудь четкой тенденции изменения во времени. Так, корреляция между порядковым номером месяца и КИПО $r_{55,30} = -0,101$. При улучшении работы печей одновременно имела тенденция снижения содержания железа в железорудной части шихты ($r_{55,21} = -0,459$), так что увеличение интенсивности работы доменных печей в данном случае не влекло за собой соответствующего роста объемов производства.

В среднем содержание железа снижалось на 0,019 % в месяц. Это может объясняться как изменением удельного веса в железорудной шихте ее отдельных компонентов, так и ухудшением качества этих компонентов. В данном случае большую роль следует приписать второй группе факторов. За исследуемый период повышался удельный вес как богатых железом ($\bar{x} = 65,6$ %) лебединских окатышей ($r_{55,17} = 0,381$), так и относительно бедных (50,05 % Fe) таштагольских руд ($r_{55,18} = 0,300$). Соответственно несколько понижалась доля собственного агломерата ($r_{55,16} = -0,275$).

При этом ухудшалось качество почти всех составляющих железорудной части шихты. Так, содержание железа в лебединских окатышах снижалось в среднем на 0,016 %, в абатурском агломерате на 0,013 %. И только содержание железа в таштагольской руде в среднем несколько росло ($r_{55,49} = 0,264$).

Тенденция к снижению качества агломерата объясняется в первую очередь снижением в сырье доли богатого коршуновского концентрата. Одновременно снижалось содержание железа в соколовско-сарбайской аглоруде ($r_{55,3} = -0,837$). Некоторое повышение качества коршуновского концентрата ($r_{55,45} = 0,525$) не могло компенсировать действия отрицательных тенденций.

При рассмотрении факторов, характеризующих затраты на производство чугуна, нет оснований говорить о наличии тенденции изменения себестоимости ($r_{55,35} = -0,053$). В то же время имел место существенный рост затрат по доменному переделу ($r_{55,36} = 0,689$), что вызвано упорядочением заработной платы, увеличением расхода кислорода, а также действием ряда других факторов.

Не проявляется тенденция изменения во времени такой статьи расходов, как цена металлошихты на тонну чугуна. В связи со снижением содержания железа в металлошихте и ростом ее расхода на тонну чугуна это должно было бы, как и рост затрат по переделу, привести к росту себестоимости чугуна. Отметим, что качество чугуна за этот период не ухудшалось. Роста себестоимости не произошло, так как имела место тенденция снижения расхода топлива ($r_{55,20} = -0,273$), совершенствовалась технология доменного процесса, улучшалось использование попутной продукции.

Производственная себестоимость агломерата и такие статьи затрат на агломерат, как цена тонны металлосырья и основных материалов, расходы по переделу во времени практически не изменялись. Однако при этом снижалось качество агломерата. Так, увеличивался рассев агломерата при отгрузке с аглоцека $5 \div 0$ ($r_{55,9} = 0,606$, рост за месяц на $0,04\%$).

Перейдем к анализу взаимосвязей между факторами, характеризующими объем производства и себестоимость чугуна, с одной стороны, и характеристиками железорудного сырья и технологических параметров доменного производства — с другой. Следует в первую очередь отметить отсутствие корреляционной связи между КИПО и себестоимостью чугуна — $r_{30,35} = 0,180$. Некоторая связь имеется между КИПО и затратами по переделу — $r_{30,36} = 0,336$. Отсутствие связи между объемом производства и себестоимостью можно объяснить в первую очередь тем, что большую часть себестоимости составляют затраты на железорудное сырье, а показатели использования оборудования, расход топлива и т. п. влияют на нее сравнительно мало. Не последнюю роль,

по-видимому, играет здесь и дефицит сырья. В этих условиях рост поставок сырья, пусть даже дальнепривозного, позволяет увеличивать (естественно, в определенных пределах) объем выплавки чугуна. Но этот же фактор приведет и к росту себестоимости чугуна, так как возрастут затраты на сырье. Таким образом, имеется определенная тенденция роста себестоимости вместе с ростом объема производства и производительности оборудования. В то же время действует целая группа факторов, приводящих к снижению себестоимости с ростом объема производства (снижение условно-постоянных расходов, уменьшение удельных расходов топлива, электроэнергии и т. п.). Наблюдаемый коэффициент корреляции, незначимо отличающийся от нуля, следует в данном случае рассматривать как «равнодействующую» двух противоположных тенденций.

Рассмотрим несколько групп однородных факторов, влияющих на изменение КИПО. Первая группа — это состав железорудной шихты и качество ее отдельных компонентов, характеризующее в данном случае процентным содержанием железа. Сразу же отметим, что содержание железа как в агломерате, так и в других видах железорудного сырья, на КИПО практически не влияет. Другая картина наблюдается при рассмотрении влияния доли отдельных компонентов. Отрицательно влияет (т. е. коэффициент корреляции положителен) на КИПО доля собственного агломерата в железорудной части шихты, $r_{18,30} = 0,419$. Соответственно приводит к снижению КИПО рост доли лебединских окатышей, $r_{17,30} = -0,635$. Поскольку содержание железа в окатышах значительно выше, чем в агломерате ($65,6\%$ против $56,9\%$), на первый взгляд все естественно. Только остается неясным, почему не влияет на КИПО доля относительно бедной ($50,05\%$ железа) таштагольской доменной руды — $r_{18,30} = 0,232$. Однако анализ матрицы коэффициентов корреляции показывает, что увеличение доли лебединских окатышей не ведет к росту содержания железа в железорудной части шихты. Соответствующий коэффициент $r_{17,21} = 0,078$. В свою очередь, повышение содержания железа в шихте не ведет к росту производительности печей — $r_{26,30} = 0,005$. Добавим еще к сказанному, что лебединские окатыши и таштагольская руда являются не взаимодополняющими, а скорее взаимоисключающими ($r_{17,18} = -0,300$), хотя связь и довольно слаба.

Дело в том, что в сложившейся на комбинате ситуации дефицита железорудного сырья качество его отодвигалось на второй план. Его изменение в определенных пределах

(в данном случае от 55,65 до 58,45 % железа в железорудной шихте) практически никак не влияло на среднемесячные показатели работы доменных печей. Но выход за эти пределы, т. е. использование более бедного сырья, может привести к снижению абсолютных объемов производства чугуна.

Следующая группа факторов, влияющих на изменение КИПО, — это текущие простои (x_{27}) и тихий ход (x_{28}). Их увеличение естественным образом влечет за собой ухудшение КИПО. Коэффициенты корреляции значимы: $r_{27,30} = 0,424$, $r_{28,30} = 0,595$. Отметим, что из этих двух показателей именно «тихий ход» тесно связан с долей лебединских окатышей: $r_{17,27} = -0,577$.

Отдельно следует рассмотреть влияние фактора x_{29} — «потери железа». В основном он должен влиять на стоимостные показатели, и его тесная связь с КИПО ($x_{29,30} = 0,507$) еще раз подтверждает тезис о том, что основное влияние оказывает здесь нехватка сырья. Потери железа не компенсируются увеличением расхода сырья.

И последняя группа факторов — это технологические параметры доменной плавки. Здесь выделяются следующие: x_{31} — давление ($r_{30,31} = -0,542$); x_{32} — температура дутья ($r_{30,32} = -0,364$); x_{34} — содержание кислорода в дутье ($r_{30,34} = -0,258$). Отметим, что имеется тенденция увеличения давления ($r_{35,31} = 0,458$) и содержания кислорода в дутье ($r_{35,34} = 0,689$). Это вполне естественно, так как в данном случае эти факторы выступают в роли компенсирующих при снижении содержания железа в шихте и ухудшении качества агломерата (показатели усреднения и рассева агломерата). Таким образом, совершенствование технологии доменной плавки позволяло поддерживать производительность печей на среднем уровне при снижении качества сырья.

Сказанное выше поясняет, почему отсутствует тесная корреляционная связь между объемом производства агломерата и соответствующими показателями работы доменного производства. Так, $r_{13,30} = -0,185$. Изменения в объеме производства чугуна определяются в основном наличием или отсутствием других видов сырья.

Объем производства агломерата определяется производительностью в «горячий» час ($r_{10,13} = 0,842$), затратами времени на капитальные и планово-предупредительные ремонты ($r_{11,13} = -0,453$) и текущими простоями ($r_{12,13} = -0,653$). В свою очередь, производительность оборудования зависит от таких показателей, как расход железорудного сырья ($r_{4,10} = -0,439$) и твердого топлива ($r_{6,10} = -0,449$). Имеется отрицательная связь производитель-

ности с содержанием железа в агломерате: $r_{8,10} = -0,235$, что объясняется самой технологией производства агломерата.

Себестоимость чугуна, как уже отмечалось, в основном определяется себестоимостью железорудного сырья. Это находит свое отражение и в коэффициенте корреляции. Так, с ценой металлошихты, расходуемой на производство тонны чугуна, связь очень тесная: $r_{25,35} = 0,803$. В то же время относительно слабо влияет такой фактор, как затраты по переделу: $r_{35,36} = 0,287$. Растет себестоимость чугуна с ростом содержания железа в шихте: $r_{21,35} = 0,455$. Если учесть, что имела тенденция уменьшения значений этого фактора, а также тенденция роста затрат по переделу, то можно предположить, что взаимопротивоположное влияние этих факторов стабилизировало себестоимость. Также взаимно нейтрализовали друг друга такие факторы, как расход топлива и себестоимость тонны кокса. За последний период расход топлива снижался, но затраты на производство тонны кокса росли.

Растет себестоимость и с ростом потерь железа: $r_{29,35} = 0,507$, по тенденции роста или снижения потерь железа в исследуемом периоде не наблюдалось. Это можно объяснить тем, что по сравнению с другими металлургическими предприятиями средний уровень потерь железа на исследуемом предприятии был достаточно низок и достигнут довольно давно.

Поскольку основную часть металлошихты составляет собственный агломерат, затраты на его производство существенно влияют на себестоимость, $r_{15,35} = 0,726$. В свою очередь, себестоимость агломерата определяется затратами на металосырье и основные материалы: $r_{2,15} = 0,815$. Объем производства агломерата при этом практически не влияет на его себестоимость: $r_{13,15} = -0,139$.

Из других факторов отметим x_7 — содержание железа в железорудном сырье для агломерации: $r_{7,15} = 0,279$, а также долю наиболее богатого сырья — коршунского концентрата: $r_{1,15} = 0,292$. Поскольку сырье для агломерации почти все дальнепривозное, этот факт может объясняться соотношением цен на товарные железные руды различного качества. Приводит к повышению себестоимости агломерата и рост удельного расхода железорудного сырья: $r_{4,15} = 0,285$.

Проведенный анализ влияния различных факторов на объем производства чугуна и агломерата и их себестоимость позволяют сделать вывод, что нехватка железорудного сырья

ческие характеристики работы предприятия и его переделов, проводится анализ сложившихся тенденций изменения этих факторов и выходных показателей, рассчитываются количественные оценки взаимосвязи между всеми факторами и показателями функционирования объекта исследования (предприятия или группы технологических переделов). Дается содержательная интерпретация и логическое обоснование количественных оценок взаимосвязей на основе имеющихся теоретических представлений и эмпирических знаний об исследуемом объекте. Таким образом, создается основа для построения математической модели производственной системы, адекватно отражающей структуру изучаемого объекта, его основные параметры и их взаимосвязи.

На втором этапе исследования изучаются возможности функционирования объекта при различных изменениях как внешних условий производства, так и ряда эндогенных переменных. Построенная модель объекта позволяет «проигрывать» различные варианты обеспечения предприятия ресурсами из заданного круга предприятий-поставщиков, а также имитировать в диалоговом режиме различные изменения технологических параметров. Основная идея использования модели, построенной на множестве фактических реализаций для имитации поведения объекта, заключается в замене прошлой фактической информации данными, генерируемыми в машинном эксперименте. В результате имитации можно оценить влияние возможных изменений любых входных факторов или технологических параметров на величины выходных показателей, что важно как для аналитических целей, так и для принятия решений. Такое исследование корректно в пределах относительной стабильности структуры внутренних и внешних связей объекта, пока сохраняет силу большинство наблюдавшихся зависимостей, положенных в основу дескриптивной модели объекта.

Одной из основных на данном этапе исследования является задача прогнозирования результатов производства при различных условиях обеспечения его ресурсами. Речь здесь идет не о прогнозе на какой-то период времени, а о прогнозировании состояния исследуемой системы при изменении значений экзогенных переменных в ту или другую сторону.

Имитационная модель может служить информационной базой для постановки задач оптимизации функционирования предприятия. Задача оптимизации здесь сводится к решению проблемы оптимальной адаптации объекта к возможным изменениям внешних факторов, поддержанию наилучших условий функционирования. Таким образом, уже сама по-

становка задач оптимизации требует в данном случае изучения воздействия тех или иных изменений условий функционирования на основные показатели производства, т. е. прогнозных расчетов. В зависимости от результатов прогноза состояния производства при различных значениях факторов, характеризующих внешние условия, определяются те важнейшие условия и ограничения, которые необходимо учитывать при постановке задач оптимизации.

Результаты решения оптимизационных задач могут использоваться при формировании требований к внешним условиям обеспечения производства для достижения необходимого уровня выходных показателей, а также для оценки максимально достигаемого уровня производства при различных значениях экзогенных переменных и полном использовании резервов в организации производства и совершенствовании технологии.

На третьем этапе исследования производственной системы моделируется ее деятельность при сильном изменении как внешних условий (например, поставщиков сырья), так и внутренней структуры (ввод новых производственных мощностей, выбытие части старых). Дескриптивная модель, построенная на основе информации о функционировании объекта за некоторый период, может быть использована при сохранении основных из наблюдавшихся условий как для краткосрочного, так и среднесрочного прогнозирования, но для более отдаленной перспективы (15—20 лет) зависимости между показателями модели в большинстве своем не сохраняются. Такие связи и зависимости при долгосрочном прогнозировании следует оценивать с помощью нормативных методов. В частности, здесь могут использоваться различные балансовые расчеты. При этом расчеты входных факторов по нормативным моделям должны выполнять роль внешнего генератора вариантов условий функционирования производственных объектов и служить информационной основой для долгосрочных прогнозов развития объектов. Дескриптивная же модель будет значительно менее детализирована по сравнению с используемой на втором этапе. В нее войдут только наиболее устойчивые связи между параметрами производственного процесса, справедливые для действующей технологии, при условии, что замены технологии не произойдет. Так, например, ясно, что в течение длительного периода в черной металлургии будет преобладать доменный способ выплавки чугуна.

Используя в комплексе как взаимодополняющие укрупненную дескриптивную модель и нормативный генератор ва-

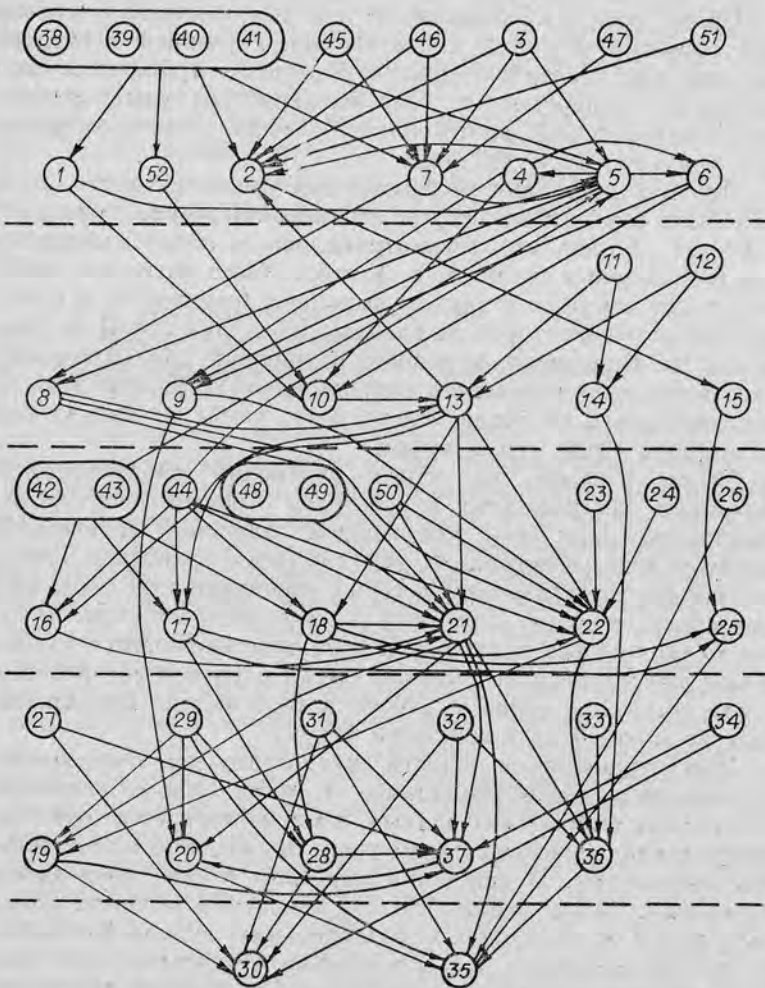


Рис. 9.1. Схема взаимодействия показателей модели

изводства. Третий уровень — характеристики шихтовых материалов для доменного производства, четвертый — технологические показатели и характеристики затрат в доменном производстве. Наконец, на пятом уровне — выходные показатели, являющиеся результирующими для всего процесса производства чугуна.

Приведем уравнения и неравенства модели, соответствующие рис. 9.1 (порядок соотношений для переменных соот-

ветствует порядку расчетов по модели):

$$x_1 = \frac{x_{38}}{x_{38} + x_{39} + x_{40} + x_{41}} \times 100, \quad (9.1)$$

$$55 \leq x_1 \leq 75$$

— это уравнение расчета доли коршунковского концентрата в металлошихте для агломерации имеет балансовый характер;

$$x_7 = \frac{x_{38} \cdot x_{45} + x_{39} \cdot x_3 + x_{40} \cdot x_{46} + x_{41} \cdot x_{47}}{x_{38} + x_{39} + x_{40} + x_{41}}, \quad (9.2)$$

$$57 \leq x_7 \leq 61$$

— балансовое соотношение для расчета среднего содержания железа в железорудном сырье для агломерации;

$$x_5 = 74,15 + 0,4(x_1 - 68,67) + 0,6(x_{52} - 6,81) -$$

$$- 7,072(x_7 - 59,54) + 1,3 \times \left(\frac{x_{42} \cdot 100}{x_{42} + x_{43} + x_{44} + 22000} - 9,46 \right), \quad (9.3)$$

$$56,5 \leq x_5 \leq 95$$

— это соотношение для расхода флюсов на тонну агломерата получено на основе регрессионного уравнения;

$$x_4 = 1043,37 + 1,026(x_5 - 74,15), \quad 1002 \leq x_4 \leq 1075 \quad (9.4)$$

— регрессионное уравнение для показателя расхода металлошихты на тонну агломерата в зависимости от расхода флюсов;

$$x_6 = 71,15 + 0,050(x_4 - 1043,37) + 0,2(x_1 - 68,67) +$$

$$+ 0,35(x_{52} - 6,81), \quad (9.5)$$

$$61 \leq x_6 \leq 75$$

— уравнение регрессии для показателя расхода твердого топлива на 1 т агломерата;

$$x_8 = 56,91 - 0,017(x_4 - 1043,37) + 0,535(x_7 - 59,54),$$

$$55 \leq x_8 \leq 57,7 \quad (9.6)$$

— то же, для показателя содержания железа в агломерате;

$$x_9 = 19,15 + 0,0049(x_4 - 1043,37) + 0,028(x_5 - 74,15) -$$

$$- 0,0469(x_6 - 71,15), \quad (9.7)$$

$$17,9 \leq x_9 \leq 21$$

— то же, для показателя зависимости содержания мелких фракций в агломерате от расхода металлошихты на тонну агломерата, расхода флюсов и твердого топлива на тонну агломерата;

$$x_{10} = 1,165 - 0,001(x_1 - 68,67) - 0,0030(x_{52} - 6,81) - 0,004(x_6 - 71,15) - 0,0005(x_4 - 1043,37) - 0,012(x_8 - 56,91), \quad (9.8)$$

$$1,13 \leq x_{10} \leq 1,23$$

— это уравнение построено с использованием регрессионного уравнения для зависимости x_{10} от расхода металлошихты и твердого топлива на тонну агломерата. Кроме того, была введена зависимость удельной производительности агломашин от долей концентратов в металлошихте (она исследована и описана в литературе [Якименко и др., 1978]), а также зависимость от содержания железа в агломерате;

$$x_{13} = 21850,0 + 18275,0(x_{10} - 1,165) - 242,1(x_{11} - 4,35) - 231,4(x_{12} - 3,65), \quad (9.9)$$

$$x_{13} \leq 22350; \quad x_{13} \leq ((x_{38} + x_{39} + x_{40} + x_{41})/x_4) \times 1000 + 250$$

— производство агломерата определяется регрессионным уравнением при выполнении ограничений сверху по производственной мощности аглофабрики (первое неравенство) и балансового ограничения по сырью (второе неравенство). При этом во второе неравенство введена допустимая балансовая невязка ($\approx 1,4\%$), учитывающая возможную ошибку расчета x_{13} и существование запаса металлотырья;

$$x_2 = (x_{38}(17,76 + 0,38(x_{45} - 63)) + x_{39}(13,33 + 0,44 \times (x_3 - 55)) + x_{40}(13,77 + 0,75(x_{46} - 49)) + x_{41}x_{51})/x_{13} + 0,0072x_5 \quad (9.10)$$

— уравнение для расчета средней цены металлотырья и основных материалов на тонну агломерата построено на основе действующих цен и надбавок за содержание железа для каждого вида сырья по поставщикам (с учетом транспортных затрат). Средняя цена флюсов вычислена по данным выборки;

$$x_{14} = 3,17 + 0,019(x_{11} - 4,35) + 0,04(x_{12} - 3,65) \quad (9.11)$$

— регрессионное уравнение для показателя расходов по агломерационному переделу;

$$x_{15} = 23,18 + 0,853(x_2 - 17,81) \quad (9.12)$$

— уравнение регрессии для показателя себестоимости агломерата;

$$x_{16} = \frac{x_{13} + x_{44}}{x_{13} + x_{42} + x_{43} + x_{44}} \times 100, \quad 74 \leq x_{16} \leq 93$$

— балансовое соотношение для расчета доли агломерата в доменной металлошихте;

$$y_{17} = \frac{x_{42}}{x_{13} + x_{42} + x_{43} + x_{44}} \times 100, \quad 2 \leq x_{17} \leq 20 \quad (9.14)$$

— то же, для расчета доли окатышей в металлошихте;

$$x_{18} = 100 - (x_{16} + x_{17}), \quad 2 \leq x_{18} \leq 7,5 \quad (9.15)$$

— уравнение расчета доли таштагольской руды в металлошихте;

$$x_{21} = 57,25 + 0,803 \left(\frac{x_{13} \times x_8 - x_{44} \times x_{50}}{x_{13} + x_{44}} - 56,9 \right) + 0,04(x_{16} - 81,01) + 0,119(x_{17} - 9,46) - 0,032(x_{18} - 6,01), \quad 56 \leq x_{21} \leq 60 \quad (9.16)$$

— уравнение регрессии для показателя среднего содержания железа в доменной металлошихте. Здесь переменная содержания железа в агломерате заменена расчетным выражением;

$$x_{22} = 203,2 - 36,46 \left(\frac{x_{13} \times x_8 + x_{44} \times x_{50}}{x_{13} + x_{44}} - 56,9 \right) + 23,164(x_9 - 19,15) + 11,128(x_{18} - 6,01) - 0,598(x_{23} - 26,24) - 0,491(x_{24} - 57,04), \quad 60 \leq x_{22} \leq 310 \quad (9.17)$$

— это соотношение для показателя количества перешихтов получено на основе регрессионных уравнений;

$$x_{19} = 1691,4 - 30,612(x_{21} - 57,25) + 0,062(x_{22} - 203,2) + 18,171(x_{29} - 3,05), \quad 1620 \leq x_{19} \leq 1740 \quad (9.18)$$

регрессионное уравнение для показателя расхода ме —

таллошихты на тонну чугуна;

$$x_{25} = 40,24 + 1,212(x_{15} - 23,18) + 0,134(x_{17} - 9,46) - 0,113(x_{18} - 6,01) \quad (9.19)$$

— уравнение регрессии для показателя цены металлошихты на 1 т чугуна;

$$x_{28} = 0,45 - 0,04(x_{17} - 9,46) + 0,03(x_{18} - 6,01) + 0,08(x_{29} - 3,05), \quad (9.20)$$

$$0,2 \leq x_{28} \leq 1,5$$

— уравнение для расчета показателя тихого хода, полученное в результате корректирования коэффициентов регрессии исходного уравнения при переходе от абсолютного показателя к относительному;

$$x_{30} = 0,49 + 0,00015(x_{19} - 1691,4) + 0,0070(x_{27} - 1,03) + 0,0085(x_{28} - 0,45) - 0,025(x_{31} - 1,68) - 0,0003(x_{32} - 1118,5) - 0,0025(x_{34} - 26,85), \quad (9.21)$$

$$x_{30} \geq 0,42$$

— уравнение регрессии для выходной переменной КИПО при технологическом ограничении снизу на значение этой переменной;

$$x_{36} = 5,77 + 0,51(x_{14} - 3,17) - 0,065(x_{21} - 57,25) + 0,0009(x_{22} - 203,2) - 0,005(x_{32} - 1118,5) - 0,03(x_{33} - 10,28) \quad (9.22)$$

— уравнение для расчета показателя расходов по доменному переделу, построенное на основе уравнений регрессии этой переменной;

$$x_{37} = 16010 + 245(x_{21} - 57,25) - 322(x_{27} - 1,03) - 208(x_{28} - 0,45) + 895(x_{31} - 1,68) + 11,5(x_{32} - 1118,5) + 80,0(x_{34} - 26,85),$$

$$x_{37} \leq \frac{8000 \cdot 357}{x_{30} \cdot 365} + 250;$$

$$x_{37} \leq \frac{x_{13} + x_{42} + x_{43} + x_{44}}{x_{19}} \times 1000 + 250 \quad (9.23)$$

— это уравнение расчета показателя выпуска чугуна в сутки построено на базе уравнения регрессии с добавлением зависимости от показателя содержания железа в металлоших-

те. Значение коэффициента при x_{21} оценено по взятым из литературы данным о специальных экспериментах с корректировкой на условия комбината и соответствует приросту производства на 1,5 % при росте содержания железа на 1 % [Вегман, 1981]. Первое технологическое ограничение означает, что производство не может превышать объема, рассчитанного по КИПО с учетом возможной ошибки расчета ($\approx 1,5$ %). Второе ограничение означает, что производство должно удовлетворять балансу сырья с учетом погрешности расчета (до 1,5 %);

$$x_{20} = 537,66 + 1,612(x_9 - 19,15) - 8(x_{21} - 57,25) + 4,065(x_{29} - 3,05) + 1,5(x_{34} - 26,85) - 0,16(x_{32} - 1118,5),$$

$$495 \leq x_{20} \leq 565 \quad (9.24)$$

— данное уравнение для показателя расхода кокса построено на основе регрессионных уравнений. При этом введена дополнительно зависимость от содержания мелких фракций в агломерате с коэффициентом, соответствующим росту расхода кокса на 0,3 % при росте на 1 % содержания мелочи [Там же], а также от доли кислорода и температуры дутья, что позволяет учесть комбинированный характер режима дутья, когда одновременно растет доля кислорода в дутье, температура дутья и расход природного газа;

$$x_{35} = 64,23 + 0,024(x_{20} - 537,66) + 1,286(x_{21} - 57,25) + 1,15(x_{25} - 40,24) + 0,025(x_{26} - 34,44) + 0,446(x_{29} - 3,05) - 3(x_{31} - 1,68) + 0,899(x_{36} - 5,77) \quad (9.25)$$

— уравнение регрессии для выходной переменной — себестоимости тонны чугуна.

Представленная уравнениями (9.1)–(9.25) модель позволяет проводить расчеты вариантов функционирования аглоизвесткового и доменного производств при различных объемах поставок железорудного сырья и значениях технологических параметров. Существование имеющего экономический смысл решения, учитывающего и возможности технологии, гарантируется самим способом построения модели. Если закрепить все входные факторы на уровне средних значений за исследуемый период, то и значения выходных показателей будут равны соответствующим средним.

Основными направлениями использования данной модели являются прогнозирование объемов производства чугуна при различных вариантах снабжения комбината сырьем и оценка возможности замены одних видов сырья другими.

Т а б л и ц а 9.1

Результаты вариантных расчетов по имитационной модели

Показатель	Расчетные варианты функционирования					
	I	II	III	IV	V	VI
Расход коршуновского концентрата за год, тыс. т	5715	4635	6205	4560	6240	6205
Расход соколовско-сарбайской аглоруды за год, тыс. т	1122	1350	1205	1350	1095	1205
Расход лисаковского концентрата за год, тыс. т	567	695	0	730	182	0
Расход прочего аглосырья за год, тыс. т	915	1496	950	1535	1095	950
Содержание железа в агломерате, %	56,91	56,30	57,57	55,84	57,79	57,57
Удельная производительность агломашии, т/горячий час	1,165	1,186	1,185	1,182	1,184	1,185
Капитальные и планово-предупредительные ремонты, %	4,35	5,8	4,4	6,2	4,4	4,4
Текущие простои агломашии, %	3,65	5,5	3,15	6,0	3,0	3,15
Производство агломерата в год, тыс. т	7975	7829	8140	7727	8148	8140
Себестоимость 1 т агломерата, руб.	23,18	23,35	23,49	23,60	23,84	23,49
Расход окатышей за год, тыс. т	935	400	2005	2005	182	2005
Расход таштагольской руды за год, тыс. т	595	694	475	585	694	548
Расход абагурского агломерата за год, тыс. т	348	330	75	110	330	0
Среднее содержание железа в доменной металлошихте, %	57,25	56,05	58,80	57,31	57,28	58,78
Количество перешихтовок за месяц (в среднем)	203	290	89	177	224	96
Текущие простои доменных печей, %	1,03	2,5	0,3	1,0	2,5	0,3
Тихий ход, %	0,45	0,71	0,0	0,0	0,79	0,0
Расход кокса и природного газа на 1 т чугуна, кг	537,7	546	520	530	538	521
Производство передельного чугуна за год, тыс. т	5845	5420	6582	6198	5600	6578
КИПО	0,491	0,520	0,434	0,460	0,507	0,435
Затраты по доменному переделу на 1 т, руб.	5,77	6,03	5,31	5,61	6,78	5,31
Себестоимость 1 т чугуна, руб.	64,23	63,02	65,27	64,70	64,31	65,16

В проведенных расчетах (табл. 9.1) вариант I соответствует реальной работе комбината за пять лет. При расчете остальных пяти вариантов оценивалось влияние изменения обеспеченности отдельными видами железорудного сырья на по-

казатели работы аглоизвесткового и доменного производств. Варианты разрабатывались следующим образом. Уровень снабжения каким-либо одним или двумя видами сырья выводился на нижнюю границу, а значения всех других факторов подбирались в диалоговом режиме так, чтобы выйти на возможно больший в данных условиях объем производства. Естественно, что при этом выбирался наиболее благоприятный технологический режим. В таблице представлены не только показатели объемов сырья и выходные показатели, но и ряд других факторов и рассчитываемых в модели показателей, чтобы несколько шире обрисовать складывающиеся ситуации.

Вариант II можно назвать «пессимистическим» с точки зрения обеспечения комбината сырьем. Одновременно в нем предусматривается резкое снижение объемов поступления и расходов коршуновского концентрата и окатышей Лебединского ГОКа. Чтобы компенсировать уменьшение их расхода, выведены на максимум расходы всех других видов сырья. Поскольку этого оказывается недостаточно для полной компенсации снижения поступления двух главных компонентов, для получения допустимого по сырью варианта расходы коршуновского концентрата и окатышей зафиксированы не на самых низких из возможных уровней. Как видно из табл. 9.1, значительно ухудшается большинство показателей. Так, производство агломерата снижается на 146 тыс. т при ухудшении его качества и увеличении простоев доменных печей. Производство чугуна снижается на 425 тыс. т в год при значительном ухудшении КИПО. Небольшое повышение удельной производительности агломашии объясняется снижением доли концентрата в шихте и ухудшением качества агломерата. Несмотря на ухудшение качества сырья, растет себестоимость агломерата из-за резкого роста расходов по переделу. Растут и расходы по доменному переделу, но вследствие использования более дешевого сырья себестоимость чугуна снижается.

Вариант III — «оптимистический» (расход сырья высокого качества допускается на максимально возможном уровне). При его осуществлении становится возможным отказ от бедного железом фосфористого лисаковского концентрата, значительное снижение расхода таштагольской доменной руды. При закреплении на требуемом уровне технологических параметров существенно улучшаются показатели работы производства. Производство агломерата возрастает на 165 тыс. т достигая почти предельной величины. При этом содержание железа в агломерате увеличивается с 56,91 до 57,57 %. Про-

изводство передельного чугуна растет на 737 тыс. т и достигает уровня почти 6,6 млн т в год. КИПО при этом доводится до 0,434. Ухудшается по сравнению с базовым вариантом только один показатель — себестоимость тонны чугуна, которая возрастает более чем на 1 руб. Это происходит при значительном снижении расхода топлива (и соответственно затрат на него), а также уменьшении расходов по переделу на 46 коп. на тонну. Причина роста себестоимости — переход на сырье высокого качества, но дальнепривозное и поэтому дороже.

В варианте IV рассматриваются последствия снижения поступления и соответственно расхода коршунковского концентрата при благоприятной ситуации со всеми остальными видами сырья. Падение расхода коршунковского концентрата до заданной нижней границы (4560 тыс. т в год) не может быть полностью компенсировано увеличением поставок других видов железорудного сырья. Увеличивается количество простоев агломашии, а производство агломерата снижается на 248 тыс. т по сравнению с базовым вариантом при ухудшении качества агломерата и росте его себестоимости. Увеличение поставок окатышей до максимального уровня позволит произвести около 6,2 млн т чугуна, однако это почти на 400 тыс. т меньше, чем в «оптимистическом» варианте. По сравнению с базовым вариантом растет и себестоимость чугуна.

Вариант V дает представление о работе производств при значительном уменьшении поставок лебединских окатышей (их доля в металлошихте падает до 2 %). В этом случае даже при максимальном использовании мощности аглофабрики и повышении содержания железа в агломерате компенсировать отсутствие окатышей невозможно, и неизбежно значительное снижение выплавки чугуна по сравнению с базовым вариантом. Значительно ухудшается КИПО, растет удельный расход кокса и природного газа.

В варианте VI предполагается отказ от использования абагурского агломерата. Влияние этого компонента не столь значительно, как коршунковского концентрата и лебединских окатышей. Отсутствие абагурского агломерата может быть компенсировано при сложившейся схеме снабжения комбината другими видами железорудного сырья без сколько-нибудь существенного ухудшения показателей работы доменного производства. Аналогичные результаты были получены и при рассмотрении на нижнем уровне абсолютных расходов лисаковского концентрата, соколовско-сарбайской аглоруды и таштагольской доменной руды.

Итак, приведенная имитационная модель дает возможность оценить влияние на результаты производства изменений как условий снабжения сырьем, так и технологических параметров. Рассмотрение вариантов позволяет сделать вывод, что в действующих доменных печах в перспективе возможен значительный рост выплавки чугуна. Но при этом усиливается ориентация на дальнепривозное сырье, что препятствует даже при улучшении всех технологических параметров работы доменных печей и довольно большом снижении расхода топлива сколько-нибудь существенному снижению себестоимости чугуна. Альтернативой данным вариантам может служить развитие местной железорудной базы.

§ 4. Оценка возможности работы комбината в перспективе на местном железорудном сырье

Недостатки в снабжении комбината железорудным сырьем позволяют ставить вопрос о переходе его на использование местного железорудного сырья. Описанная выше и использованная для расчетов модель (9.1)—(9.25) пригодна лишь для существующей на момент построения модели схемы обеспечения комбината железорудным сырьем. Поэтому возникает задача моделирования и прогнозирования показателей работы агломерационного и доменного производств комбината при обеспечении его местными рудами.

Надо иметь в виду, что при изменении состава и соотношения рудных составляющих, особенно при переходе на новое сырье, количественные характеристики связей между показателями производства могут существенно измениться. В первую очередь это относится к показателям, зависящим от качественных характеристик сырья (химического состава, механических свойств), не учитываемых в модели.

В группу таких показателей входят расход флюсов, топлива и металлошихты на тонну агломерата. При изменении состава сырья эти показатели необходимо рассчитывать вне данной модели и использовать их для дальнейших модельных расчетов как независимые входные переменные. Кроме того, необходимо наложить ограничение по химическому составу агломерата и чугуна, чтобы заранее исключить недопустимые варианты сочетаний руд, так как модель не учитывает эти характеристики. Из сказанного следует, что необходим некий нормативный внешний «генератор» вариантов шихты, который бы мог использоваться в комплексе

с моделью, служа информационной основой имитационных расчетов.

«Генератором» вариантов может служить набор программ на ЭВМ, реализующий комплексный метод расчета шихты доменной плавки [Рамм, 1980]. Комплекс программ создан в Институте математики и механики Уральского научного центра в лаборатории математико-экономических моделей. Расчет доменной шихты основан на решении системы уравнений материального и теплового баланса. При этом требуется задать ряд условий и параметров, характеризующих используемое сырье и топливо, а также продукты плавки. Метод Рамма позволяет рассчитать удельные расходы рудных компонентов, флюсов, топлива, химический состав агломератов, чугуна и другие параметры. Результаты расчетов дают возможность сделать вывод о совместимости руд, технологической допустимости различных вариантов шихты. Расчеты по этому методу частично дублируют расчеты по модели функционирования, что позволяет сравнивать их результаты и судить об обоснованности построенной модели.

Необходимо заметить, что метод Рамма хорошо описывает химические и тепловые процессы доменной плавки, но в меньшей степени учитывает физические факторы (гранулометрический состав сырья и т. д.) и совсем не учитывает организационно-технологические факторы (простой, сбой в процессе производства и т. п.). Расчеты здесь ведутся только в удельных единицах (на тонну сырья или тонну чугуна). Производительность агломашии и доменных печей и технико-экономические показатели производства не участвуют в расчетах. Но как раз большинство названных факторов находит отражение в построенной модели функционирования.

Все выше сказанное обуславливает возможность и целесообразность использования метода расчета шихты по Рамму в комплексе с моделью функционирования (в сокращенном виде) для моделирования различных вариантов обеспечения предприятия железорудным сырьем. Варианты обеспечения строились в соответствии с имеющимися проработками отраслевых проектных институтов.

Три возможных варианта снабжения аглофабрики, входящей в состав комбината, железорудным сырьем приводятся в табл. 9.2. При этом собственная аглофабрика обеспечивает потребность доменного производства примерно на три четверти, а остальной агломерат поступает со стороны.

Для всех вариантов предусмотрены дополнительные поставки агломерата с Аскизской АОФ. Варианты 2 и 3 предусматривают полный отказ от концентрата Коршуновского

Таблица 9.2

Варианты удовлетворения потребности аглофабрики комбината в железорудном сырье, тыс. т

Железорудное сырье по источникам	Содержание железа, %	Вариант		
		1	2	3
Концентрат Новомундыбашской ОФ	64,6	265	200	1665
Концентрат Белорецко-Инского ГОКа	64,9	4105	4880	580
Концентрат Коршуновского ГОКа	63,0	4680	0	0
Концентрат Холзунского ГОКа	64,6	0	4000	4000
Инская аглоруда	51,7	4000	4000	4000
Добавки: отсеv агломерата и окалина	...	730	730	730
Итого железорудного сырья (сухой вес)	...	7780	7810	7975
Среднее содержание железа в сырье	...	61,59	62,60	62,58

ГОКа, в то время как в варианте 1 объем поставок с этого ГОКа предусматривается на том уровне, какой сложился в рассматриваемом периоде. Различия между вариантами 2 и 3 вызваны в основном альтернативой: развивать Белорецко-Инскую ГОК или вводить в строй Табратский ГОК. В вариантах это находит косвенное отражение, так как продукция Табратского ГОКа пойдет на Аскизскую АОФ, вытекая оттуда на аглофабрику комбината концентрат Новомундыбашской ОФ (вариант 3). Концентрат Новомундыбашской ОФ выступает в данном случае как замещающий концентрат Белорецко-Инского ГОКа. Основным же заместителем продукции Коршуновского ГОКа в вариантах 2 и 3 выступает концентрат Холзунского ГОКа.

Расчет доменной шихты ведется по всему поступающему сырью в целом. Порядок расчета для каждого варианта обеспечения комбината железорудным сырьем следующий. В соответствии с балансом по источникам обогащенного сырья и потребностями аглофабрик определяются доли каждого вида сырья в шихте данной аглофабрики. Затем для полученной смеси руд рассчитываются по методу Рамма показатели расхода флюсов, металлошихты на тонну агломерата и содержание железа в агломерате. Попутно рассчитываются химические составы получаемых агломератов и чугуна из заданной смеси руд. Если эти параметры не выходят за определенные границы, то заданный вариант считается допустимым.

мым для дальнейших модельных расчетов. Полученные показатели становятся входными для модели. При этом приведенная выше модель (9.1)–(9.25) используется в сокращенном виде, а именно: из уравнений для показателей агломерационного производства рассчитываются уравнения (9.7)–(9.9). Вместо рассчитывавшегося ранее содержания железа в доменной металлошхте используется рассчитанный по методу Рамма показатель среднего содержания железа в агломерате. В доменном производстве рассчитываются уравнения только для основных показателей, а именно уравнения (9.18), (9.21), (9.23) и (9.24) имитационной модели. Остальные показатели принимаются на среднем наблюдавшемся уровне, что дает небольшую погрешность результатов.

Результаты расчетов вариантов шихты позволили сделать вывод о совместимости рассматриваемого железорудного сырья и допустимости его использования для условий комбината. Информация, полученная в результате расчетов вариантов шихты, используется как исходная для расчетов по модели функционирования объекта. Сравнение значений некоторых показателей, которые рассчитываются по методу Рамма и в модели функционирования, показало, что разница между ними не превышает 0,5 % их абсолютной величины, а тенденции их изменения по различным вариантам совпадают. Это можно рассматривать как дополнительное свидетельство в пользу пригодности модели функционирования для прогнозных расчетов такого типа.

В табл. 9.3 приводятся основные результаты прогнозных расчетов для вариантов обеспечения комбината сырьем на перспективу. Первые три варианта соответствуют рассмотренным в данном параграфе способам снабжения сырьем

Таблица 9.3

Результаты расчетов показателей производства чугуна на комбинате по комплексной модели

№ варианта	Содержание железа в доменной металлошхте, %	КИПО	Производство чугуна за год, тыс. т	Расход сухого кокса и природного газа в пересчете на кокс, кг/т
1	58,58	0,436	6550	522
2	58,27	0,437	6530	526
3	58,18	0,438	6520	527
4	58,80	0,434	6580	520

из местной железорудной базы. Для сравнения приведен четвертый вариант, соответствующий наиболее оптимистичному прогнозу функционирования комбината при существующей схеме обеспечения его сырьем.

Разница в показателях работы доменного производства по рассмотренным вариантам невелика и не превышает одного процента. Объемы производства при разных вариантах использования местного сырья несколько ниже, чем максимально возможный объем при существующей схеме снабжения. Однако последний может рассматриваться с данных позиций только как идеальный, но на практике недостижимый. Варианты же снабжения сырьем из руд местных месторождений отличаются значительно более высокой надежностью. Допустимость рассматриваемых сочетаний руд по нескольким вариантам дает возможность по мере уточнения информации о качестве руд, стоимости их добычи и переработки выбрать наиболее рациональный.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения статистических моделей функционирования предприятий для долгосрочного прогнозирования. Если исходить из обычной посылки, применяемой при статистическом прогнозировании, что период упреждения не может быть больше периода, по данным которого строилась статистическая модель объекта, то такой вывод следует признать неверным. Однако, как уже отмечалось, когда решается задача прогнозирования результатов производства при различных условиях обеспечения его ресурсами, но без замены технологии производства, то речь идет не о прогнозе на какой-то период, а о прогнозировании состояния исследуемой системы при изменении значений экзогенных переменных. В связи с этим выделяются два альтернативных направления развития предприятия. Если внешние условия функционирования и внутренняя структура производственного объекта не претерпевают крупных изменений, то дескриптивная модель развития предприятия, в основу которой положены статистические связи, может быть пригодна для прогнозирования на достаточно долгий срок. Небольшие изменения внешних и внутренних условий работы могут быть отражены при корректировке модели.

Если же произошли сильные изменения условий функционирования объекта, то для моделирования следует использовать комбинированные модели, используя как взаимодополняющие укрупненную дескриптивную модель и нормативный генератор вариантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.
- Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее применение. М.: Мир, 1972.
- Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. М.: Наука, 1963.
- Берж К. Теория графов и ее применение. М.: ИЛ, 1962.
- Браверман Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. М.: Наука, 1983.
- Вегман Е. Ф. Краткий справочник доменщика. М.: Metallurgia, 1981.
- Веселов Н. Г., Новак Л. П., Стеникин З. Л. и др. Совершенствование взаиморасчетов между доменными и сталеплавильными цехами // Сталь. № 10. 1979. С. 798—800.
- Виноградов В. Н. Экономическая оценка комплексного минерального сырья. М.: Недра, 1978.
- Воронин В. Т. Восстановление плотности распределения выборочных данных с помощью сплайнов, сохраняющих изогеометрию // Сплайн-функции в экономико-статистических исследованиях. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. С. 88—104.
- Гренджер К., Хатака М. Спектральный анализ временных рядов в экономике. М.: Статистика, 1972.
- Зыков Ю. Л. Теория конечных графов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1969.
- Использование экономико-математических методов и моделей в управлении и планировании в цветной металлургии. М.: Metallurgia, 1975.
- Казакевич Д. М. Очерки теории социалистической экономики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980.
- Катарджян С. Л., Еганян Г. К., Хуршудян А. К. Экономико-математическое моделирование химико-технологических систем. М.: Химия, 1987.
- Кильдишев Г. С., Аболenceв Ю. И. Многомерные группировки. М.: Статистика, 1978.
- Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981.
- Котюков В. И. Многофакторные кусочно-линейные модели. М.: Финансы и статистика, 1984.
- Ласкорин Б. Н., Барский Л. А., Перещ В. З. Безотходная технология переработки минерального сырья: Системный анализ. М.: Недра, 1984.
- Майзель Л. Л., Шнайман П. М. Статистическое моделирование технико-экономических процессов. М.: Статистика, 1969.
- Мандель И. Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988.
- Миркин Б. Г. Анализ качественных признаков. М.: Статистика, 1976.
- Миркин Б. Г. Анализ качественных признаков и структур. М.: Статистика, 1980.
- Мырцымов А. Ф. Черная металлургия капиталистических и развивающихся стран. Киев: Наук. думка, 1978.
- Налимов В. В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1970.
- Пуарье Д. Эконометрия структурных изменений (с применением сплайн-функций). М.: Финансы и статистика, 1981.
- Рамм А. Н. Современный доменный процесс. М.: Metallurgia, 1980.
- Розин Б. Б., Котюков В. И., Ягольницер М. А. Статистические модели с переменной структурой. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 242 с.
- Розин Б. Б., Сергеева Л. А., Ягольницер М. А. Статистическая оценка нормативов отраслевого планирования. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 190 с.
- Розин Б. Б., Ягольницер М. А. Конструирование экономико-статистических моделей с заданными свойствами. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. 172 с.
- Старр М. Управление производством. М.: Прогресс, 1968.
- Строев А. А. Оценивание переключающихся регрессий // Проблемы моделирования капиталистического воспроизводства и цикла. М.: Б. и., 1981. С. 226—236.
- Сунес П., Зинес Дж. Основы теории измерений // Психологические измерения. М.: Мир, 1967.
- Тамм Б. Г., Пуусени М. Э., Таваст Р. Р. Анализ и моделирование производственных систем. М.: Финансы и статистика, 1987. 191 с.
- Тейл Г. Прикладное экономическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1970. 510 с.
- Топоровский А. И. Экономика обогащения руд цветных металлов. М.: Недра, 1979. 166 с.
- Чалов В. И., Рыскин М. Я. Комплексное использование бедного минерального сырья и создание безотходных производств в цветной металлургии/ЦНИИцветмет экономики и информации. М., 1987.
- Чернегов Ю. А. Экономические методы управления в горной промышленности. М.: Недра, 1987.
- Черчем У., Акоф Р., Ариоф Л. Введение в исследование операций. М.: Наука, 1968.
- Ютлдер Х. Линейная модель с несколькими целевыми функциями // Экономика и мат. методы. 1967. Т. 3. № 3. С. 397—406.
- Якименко Г. С., Чесак В. Н., Хоменко П. М. Экономическое прогнозирование на металлургических предприятиях. Киев: Техника, 1978.
- Brown R. L., Durbin J. M. Techniques for testing the constancy of regression relationships over time // J. Stat. Soc. 1975. Ser. B. V. 37, N 2. P. 149—192.
- Schweder T. Some optimal methods to detect structural shifts or outliers in regression // J. Amer. Stat. Assoc. 1976. V. 71. P. 491—501.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
РАЗДЕЛ I. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОНОМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	6
Глава 1. Непрерывные производственные процессы как объект статистического моделирования	—
§ 1. Особенности организации производственного процесса на предприятиях с последовательной физико-химической переработкой сырья	—
§ 2. Задачи и объекты экономико-статистического моделирования	13
§ 3. Комплексность месторождений полезных ископаемых и возможности создания безотходных технологий	19
Глава 2. Методические подходы к моделированию непрерывных производственных процессов	27
§ 1. Основные типы моделей	—
§ 2. Методы анализа структуры многомерной совокупности	48
§ 3. Некоторые проблемы исследования динамики производственных процессов	62
Глава 3. Критерии деятельности предприятия и отдельных переделов	84
§ 1. Множественность целей производственных систем, выбор критериев и проблемы многокритериальности	—
§ 2. Построение согласованной системы критериев деятельности отдельных производственных объектов	89
§ 3. Правомерность оптимизации производственных процессов на основе статистических моделей	95
Глава 4. Основные области применения ЭСМ в непрерывных производствах	102
§ 1. Анализ деятельности предприятия	—
§ 2. Планирование производства	105
§ 3. Нормирование производства и труда	110
§ 4. Управление и прогнозирование	116

РАЗДЕЛ II. ОПЫТ РЕШЕНИЯ ТИПИЧНЫХ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ	129
Глава 5. Выбор экономически выгодных параметров функционирования основных технологических переделов	—
§ 1. Постановка задачи	—
§ 2. Краткая характеристика объекта исследования	130
§ 3. Выбор критерия оптимизации производственного процесса на предприятии. Взаимосвязь общего критерия с технико-экономическими показателями основного передела	133
§ 4. Анализ зависимостей статей затрат от объемов производства на переделе «ферментация»	136
§ 5. Экономико-статистическое моделирование процесса микробиологического синтеза антибиотика	143
§ 6. Экономический анализ результатов исследования	159
Глава 6. Оптимизация производственного процесса в технологической цепочке. Построение согласованной системы критериев	165
§ 1. Постановка задачи	—
§ 2. Характеристика объекта исследования	170
§ 3. Построение экономико-статистических моделей производства глинозема и алюминия	171
§ 4. Оптимизация технологического процесса производства глинозема и алюминия	175
Глава 7. Совершенствование внутрипроизводственного расчета на основе статистических моделей	180
§ 1. Постановка задачи	—
§ 2. Примеры использования статистических моделей для совершенствования внутризаводского хозрасчета	182
Глава 8. Оценка и прогнозирование влияния качества руд на технико-экономические показатели производства	191
§ 1. Постановка задачи	—
§ 2. Характеристика объекта исследования. Конкретизация постановки задачи	196
§ 3. Выделение и прогнозирование природных и технологических типов руд	198
§ 4. Прогнозирование технико-экономических показателей процессов обогащения (случай раздельной переработки природных типов руд)	204
§ 5. Прогнозирование технико-экономических показателей процессов обогащения (случай переработки смешанных типов руд)	213
§ 6. Выбор рациональных режимов обогащения с позиций конечной эффективности горно-металлургического производства (на примере Норильского горно-металлургического комбината)	218

Глава 9. Прогнозирование стратегии развития крупного предприятия	223
§ 1. Постановка задачи	—
§ 2. Исследование влияния отдельных факторов на работу доменного производства	227
§ 3. Прогнозирование развития доменного производства методами имитационного моделирования.	234
§ 4. Оценка возможности работы комбината в перспективе на местном железорудном сырье	245
Список литературы	250

Научное издание

Розин Бенциан Борисович
Соколов Виталий Михайлович
Ягольницер Мирон Аркадьевич

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
В ЭКОНОМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ,
ПЛАНИРОВАНИИ
И УПРАВЛЕНИИ
НЕПРЕРЫВНЫМИ
ПРОИЗВОДСТВАМИ**

Редактор издательства Р. А. Лившиц
Художественный редактор Л. Л. Мордохович
Технический редактор Л. П. Минеева
Корректоры Л. Л. Михайлова, В. В. Борисова

ИБ № 42544

Сдано в набор 19.04.90. Подписано к печати 28.01.91. Формат 84×108^{1/32}.
Бумага типографская № 2. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл.
печ. л. 13,4. Усл. кр.-отг. 13,4. Уч.-изд. л. 13. Тираж 900 экз. Заказ № 160.
Цена 3 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука». Сибирское отделение.
630099 Новосибирск, ул. Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука». 630077 Новосибирск, ул. Станиславского, 25.