

КИБЕРНЕТИКА И ХИМИЯ



П. Г. КУЗНЕЦОВ, Г. В. СМИРНОВ

КИБЕРНЕТИКА И ХИМИЯ

ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧИТЕЛЕЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО „ПРОСВЕЩЕНИЕ“

Москва 1966

Рецензент
старший научный сотрудник
лаборатории автоматизации ГИРЕДМЕТа
Ю. П. АДЛЕР

6—5

184—66

«КОЛЛЕКТИВНЫЙ МОЗГ»

Представьте себе десятилетнего мальчика, который решил стать ученым. Для этого он 16 часов в сутки читает книги, тратя на сон и еду всего 8 часов. Как вы думаете, много ли может прочитать за свою жизнь такой мальчик?

Пусть он читает книгу со скоростью 100 страниц в 1 час (в действительности, скорость чтения художественной литературы составляет 60 страниц в час, а научной — до 30). Допустим, что он будет читать 100 лет, т. е. от 10 до 110 лет. Несложный расчет показывает, что ему удастся прочитать 58,4 млн. страниц. Если теперь принять средний объем книги равным 200 страницам, то наш воображаемый мальчик сможет прочесть 292 тыс. книг.

Вероятно, такого человека никогда не было и не будет. Такого количества книг не прочитал и не сможет прочитать ни один человек в мире. А между тем в библиотеке имени В. И. Ленина хранится 20 млн. книг. Выходит, как ни старайся, а всего знать невозможно. «Никто не обнимет необъятного».

А как же быть ученым?

Жизнь ставит перед ними все новые и новые проблемы, решение которых требует знания всего передового опыта, сконцентрированного в обильном потоке ежегодно выходящих в мире книг и журналов.

Представьте себе двух школьных приятелей, решивших работать над какой-нибудь важной проблемой. Разумно взвесив свои возможности, друзья решили разделить книги на две группы по некоторому принципу. Книги одной группы читает один школьник, книги другой — второй.

Ясно, что два человека, дополняющие знания друг друга по различным отраслям науки и техники, могут сделать больше, чем люди, которые читают одинаковые книги. Тем не менее, если в процессе работы друзья не будут общаться, то наступит такой момент, когда они утратят общий язык. Если один из них занимается, скажем, алгеброй, а второй — ботаникой, то под словом «корень» каждый из них будет понимать вещи, не имеющие никакого, даже отдаленного, сходства.

Мир вещей, изучаемых наукой, практически бесконечен, а число слов не превосходит 100 000. По этой причине многие слова приходится использовать для обозначения совершенно непохожих понятий.

Именно поэтому в наши дни ученые начали приводить в порядок научную терминологию. Это оказывается тем более необходимым, что разделение труда и совместная работа ученых из смежных областей науки приводит к появлению новых «гибридных» наук. Так возникла физическая химия, биофизика, астроботаника и т. д. А создание общей терминологии немыслимо без выявления самых емких понятий, свойственных всем наукам без исключения. Такими понятиями и занимается кибернетика — наука об управлении. Она же подсказы-

вает нам и метод, позволяющий ученым справиться со все растущими требованиями науки.

В самом деле, представим себе дружный класс школьников, который решил работать в науке коллективно. Еще со школьной скамьи каждый из учеников работает в определенной области. Они имеют возможность общаться и не утрачивают взаимопонимания при изучении различных наук. Им придется выработать такой язык, на котором они будут говорить между собой. Вероятно, такой дружный класс лет через двадцать будет представлять собой «коллективного ученого», еще не виданного в науке. Этот «коллективный ученый» будет обладать поистине универсальными знаниями, которыми сегодня не обладает ни один человек. У него не будет пробелов в образовании, которые считаются почти обязательными для каждого современного деятеля науки, даже если он сегодня обладает «дремучей» эрудицией.

Язык, которым будет пользоваться такой «коллективный ученый», скорее всего будет языком, который предложил У. Р. Эшби во «Введении в кибернетику». Эту книгу мы рекомендуем нашему читателю.

В длинном ряду наук, который будет записан в актив такого небывалого «коллективного ученого», займет свое место и химическая кибернетика, совсем еще молодая наука, о которой мы и хотим рассказать в этой книге. Ее место будет не совсем обычным. Ведь еще двести с лишним лет назад М. В. Ломоносов говорил о вездесущности химии. А в наше время развитие химии составляет одну из важнейших задач построения коммунизма.

Стоит ли говорить о том, как важна химическая кибернетика, возникшая на стыке двух, самых широких, самых всеобъемлющих наук.

ПРОБЛЕМА 1

Иногда улыбнется старателю счастье, и под киркой или на песчаном дне ручья блеснет тусклый золотой самородок. Правда, это случается редко. Гораздо чаще золотые крупинки скупно рассеяны в мелком песке. Может быть в нем и много золота, зато песка еще больше. Вот и приходится неделями промывать золотоносный песок, выделять из него драгоценные крупинки. Впрочем, золото еще не самый сложный случай, оно механически перемешано с песком, и старатель занимается хоть и трудоемкой, но сравнительно несложной работой — разделением механической смеси.

Химики и металлурги занимаются более сложной задачей — разделением химических смесей. Но какими бы сложными ни казались эти вопросы, в основе разделения лежат довольно простые и наглядные закономерности, которые образно можно назвать принципом приемных испытаний. Сущность разделения состоит в том, что на смесь оказывают какое-либо воздействие, и компоненты, реагируя на него неодинаково, разделяются.

Пусть надо разделить стеклянные и железные шарики. Причем выясняется, что диаметр железных шариков меньше диаметра стеклянных. Если пропустить такую смесь сквозь «сито» с отверстиями, через которые свободно проходят железные, но задерживаются стеклянные шарики, можно легко ее разделить.

А если диаметры стеклянных и железных шариков равны, неужели разделить такую смесь нельзя?

Конечно, можно. Дальнейшее изучение показывает, что у железа и стекла разный удельный вес. Поэтому железные шарики быстрее тонут в воде, чем стеклянные, и если высыпать смесь в водяной поток, он будет сносить сильнее легкие стеклянные шарики.

Но и это еще не все. Железо и стекло обладают различной упругостью. Если шарики бросать на плиту, они будут подскакивать на разную высоту. Вот еще одна схема разделения, которую, кстати, применяют для сортировки стальных шариков.

А разве нельзя использовать разницу в магнитных свойствах железа и стекла? Поместите над смесью сильный электромагнит, и только железные шарики «прилипнут» к нему. Интересно, что в этих случаях на разделение одной и той же смеси нужно затратить разное количество энергии. Причем сегодня нет никаких гарантий, что завтра наука не обнаружит новых свойств, разделение по которым окажется в несколько раз более эффективным, чем сейчас.

Энергия, которая затрачивается на разделение, зависит от состава исходной смеси и чистоты разделенных продуктов. Ясно, что, чем меньше примесей, «загрязняющих» выходящие из установки разделенные вещества, тем труднее их удалять. В смеси, поступающей в сортировочную машину, среди миллиона крупных картофелин может быть всего одна мелкая, и тем не менее, чтобы увеличить «чистоту» получаемого продукта, приходится перебирать на машине или вручную целый миллион клубней, затрачивая на это почти столько же времени и энергии, сколько на разделение самой «грязной» смеси. Не удивительно, что вещества высокой чистоты необычайно дороги.

Чистота выходных продуктов зависит не только от количества энергии, затраченной на разделение, но и от состава смеси, подлежащей разделению. Математически эта проблема была изучена Коэном и Капланом в США, Дираком и Юри в Англии. Они установили, что, чем больше разница концентраций вещества в смеси, тем меньше энергии нужно затратить на ее разделение.

Этот вывод самым очевидным образом противоречит практике, ибо в таком случае бедные смеси разделять выгоднее, чем богатые! Другими словами, чем меньше золота в золотоносном песке, тем легче произвести разделение! Действительно, разделить 1 т смеси, которая состоит из 500 кг золота и 500 кг песка, гораздо труднее, чем 1 т смеси, содержащей 500 г золота и 999,5 кг песка. Но ведь никого не интересует, сколько тонн золотоносного песка переработано установкой. Важно другое — сколько золота она намыла. При переработке богатой смеси, чтобы получить 500 кг золота, нужно промыть всего 1 т золотоносного песка. Зато во втором случае для получения того же количества золота придется пропустить через установку тысячу тонн смеси, и тут уж расход энергии во много раз перекроет затраты на промывку 1 т богатой смеси. Поэтому никакого противоречия между теорией и практикой нет: перерабатывать богатые смеси гораздо выгоднее, чем бедные.

Основные принципы разделения, разделение по различным свойствам, затраты энергии на разделение в зависимости от требуемой чистоты выходящих продуктов и от состава исходной смеси — таковы основные вопросы, изученные исследователями разделительных установок. Разделение стало первоочередной, важнейшей проблемой современной техники сравнительно недавно, каких-нибудь 15—20 лет назад. Вопрос стоял остро и не допускал никаких компромиссных решений: либо человек сможет разделить изотопы урана, либо нет. Самая главная трудность состояла в том, что для разделения можно было использовать лишь ничтожную разницу в массе ядер этих изотопов. Однако требования ядерной энергетики не кончились на этом. Она потребовала веществ фантастической чистоты, в частности сверхчистый графит, алюминий, цирконий... Требования радиоэлект-

роники и ракетной техники превратили разделение в проблему 1.

Успехи разделительной техники заставили инженеров пересмотреть и изменить свои представления о том, что считать «бедной», а что «богатой» рудой. Более глубокое изучение свойств различных веществ приведет к новым эффективным методам разделения, и, кто знает, может быть, рудой для атомной энергетики окажется обычный гранит.

Известно, что 1 т гранита содержит ядерное горючее, при использовании которого в реакторе можно получить столько же энергии, сколько при сжигании 15 т угля. Поэтому, если будет найден метод, требующий для выделения ядерного горючего из гранита затраты энергии меньше, чем при сжигании 15 т угля, переработка гранита начнет представлять интерес.

Но ни о каком разделении не может быть и речи до тех пор, пока частицы или молекулы веществ не будут механически перемещаться относительно друг друга. Для этого смесь необходимо перевести в газообразное, распыленное или жидкое состояние, так как в твердых телах если и возможно перемещение, то с малой скоростью. Вот почему при выделении металлов или веществ, находящихся в твердой руде, ее приходится предварительно разделить либо испарением, либо расплавлением, либо растворением. Такая предварительная обработка требует огромного количества энергии.

Каждая капля морской воды — это удивительный клад, где в том или ином количестве находятся чуть ли не все элементы периодической системы. Недаром, когда в науке встал вопрос о том, где можно обнаружить предсказанный Д. И. Менделеевым экацезий, английский ученый Френд отправился искать его в воде Мертвого моря, известного высокой концентрацией солей.

А после первой мировой войны в Атлантическом океане появилось небольшое судно «Метеор». Человек, который бы попробовал нанести на карту путь этого корабля, остался бы в недоумении. Его капитан как будто задался целью побывать чуть ли не в каждом уголке Атлантического океана. Впрочем это было и в самом деле так. Немецкий химик Гебер предпринял долгое плавание на «Метеоре» для того, чтобы помочь Германии выплатить контрибуцию. Он первый попробовал добывать золото из морской воды. Его попытка окончилась неудачей — слишком мало содержание золота.

Но ведь, кроме золота, в морской воде в гораздо большем количестве находятся другие ценные вещества. В среднем в 1 км^3 океанской воды содержится около 30 млн. т поваренной соли, 6 млн. т магниевых солей, примерно 50 т рубидия, 11 т серебра, 2 т урана. Даже такой редкий элемент, как радий, можно найти в морской воде в количестве 1,5 г на 1 км^3 .

Каковы же новые пути в совершенствовании разделительных процессов?

Попытка Гебера извлекать золото из морской воды кончилась неудачей, но он обнаружил интереснейшее явление. Оказалось, что золото не растворено в морской воде, как считали раньше, а находится в ней во взвешенном состоянии в виде мельчайших крупиц. Миллиарды микроорганизмов, населяющих океан, поглощают эти драгоценные частицы. Золото постепенно накапливается в телах этих простейших организмов. Погибая, они опускаются на дно, создавая придонный осадок, обогащенный золотом.

Гербер установил даже, что самый богатый осадок находится у берегов Ньюфаундленда. Оказалось, что многие морские организмы опередили химию. Растения и животные сравнительно легко поглощают и кон-

центрируют в теле вещества, извлечение которых пока невыгодно, или даже недоступно для человека. Например, моллюски поглощают медь, асцидии — цинк, олово, свинец, водоросли и губки — иод. Некоторые элементы сначала были найдены в животных организмах и только потом уже в морской воде.

Значит, флора и фауна океана — это гигантская «биоразделительная» фабрика, подобная той, которая в доисторические времена выделяла и концентрировала рассеянный в атмосфере углерод, создавая угольные и нефтяные залежи наших дней, снабжая атмосферу кислородом.

Может быть, в будущем биологи выведут такие разновидности бактерий, водорослей, растений, которые, выделяя из окружающей среды вещества, необходимые для их существования, будут приводить к концентрации нужных нам редких или рассеянных элементов: урана, радия, золота и других.

Быстро размножающиеся бактерии смогут также очищать вещества от вредных примесей, обогащать бедные смеси, выделять из руды только те компоненты, которые нужны человеку.

Химическая кибернетика с новых позиций подошла к проблеме 1. Она обеспечивает единообразный подход ко всем «механизмам», которые используют люди для разделения различных смесей.

Еще знаменитый английский философ Фрэнсис Бэкон как-то заметил, что вся полезная деятельность человека сводится по сути дела к тому, чтобы складывать и разделять элементы, данные ему природой. Каждая из этих операций занимает немалое место и в химии. В частности, около 40% процессов в современной химической технологии представляют собой процессы разделения.

Не удивительно, что именно химики первыми пришли к необходимости создания общей теории разделения, которая дала бы возможность производить точные расчеты разделительных установок, перерабатывающих смеси любых веществ или сигналов. И, как это нередко бывает, решение частного, узкого на первый взгляд вопроса неожиданно проливает свет и дает новые подходы к широкому классу явлений. То же произошло и с теорией разделения, которая вышла за рамки химии и с равным успехом может применяться и в физике, и в химическом анализе, и в теории информации. Работы по общей теории разделения были проведены большим коллективом советских ученых: академиком Н. М. Жаворонковым, чл.-корреспондентами АН СССР М. П. Малковым, А. И. Бродским, докторами наук А. М. Розеном, Н. Н. Туницким, В. А. Соколовым и многими другими. Полученные в этих работах результаты и послужат нам увлекательным примером использования общей теории к самым различным объектам.

ТРИ ПРОБЛЕМЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Достижения в области изучения атомной энергии по праву считаются одним из самых крупных успехов, когда-либо выпадавших на долю физиков. Без тончайших исследований, проведенных ими в физических лабораториях, атомная энергетика оказалась бы химерой. Но уж если говорить строго, то эти эксперименты навсегда остались бы чисто лабораторными упражнениями и никогда не смогли бы быть использованы в промышленности, если бы не химики-ученые и инженеры.

В самом деле, на заре атомной эры, в начале лета 1940 г., самыми важными проблемами, от которых зависела судьба американского атомного проекта, считались такие:

1. Можно ли найти условия, при которых происходила бы цепная реакция?

2. Можно ли добиться выделения урана-235 в промышленном масштабе?

3. Можно ли получить замедлитель и другие материалы достаточной чистоты и в нужном количестве?

Как видите, из трех основных проблем две последние относятся к решению одной и той же проблемы разделения смеси. Правда, вопросы, поставленные перед химиками, работавшими над атомным проектом, носили непривычный для них характер. Если проблема выделения урана из руды хотя и была достаточно сложной, но все же не вызывала особых сомнений, то проблема разделения изотопов в промышленном масштабе вызывала сомнение. Как известно, для атомной энергетики особенно важен изотоп урана — уран-235, которого в природном уране содержится меньше 1 %, остальное — уран-238. Оба изотопа химически совершенно одинаковы, поэтому разделить их обычными химическими методами невозможно. Значит, нужно найти такие физические процессы, в которых ничтожное различие в атомном весе изотопов могло бы быть использовано для их разделения. Одним из самых первых методов разделения изотопов считается электромагнитный. Для этого природный элемент, скажем тот же уран, подвергается сильному нагреву или электронной бомбардировке. При этом атомы урана теряют один или несколько электронов и превращаются в положительно заряженные ионы. Движением таких частиц можно управлять с помощью электрического и магнитного полей.

Электрическое поле ускоряет ионы, которые потом фокусируются в пучок и «впрыскиваются» в вакуумную камеру. Здесь пучок попадает в сильное магнитное поле, которое заставляет ионы двигаться по окружности. Чем легче ион, тем он «послушнее» и тем круче его траектория. Тяжелые ионы отклоняются меньше, поэтому на пластинке, на которую попадают ионы, появляются две серебристые полосы — разделенные изотопы урана.

Таковыми приборами физики пользовались очень давно — ведь именно так работают масс-спектрографы, с помощью которых были открыты изотопы. Электромагнитный метод позволяет очень быстро и почти полностью разделить изотопы. Именно он помог физикам получить чистый уран-235, необходимый для изучения свойств этого важнейшего ядерного горючего.

Но от такой лабораторной установки до промышленности — «дистанция огромного размера». Ведь обычный масс-спектрограф имеет ничтожную производительность — порядка долей микрограмма в час. «Осуществить же разделение в промышленных масштабах и получать изотопы хотя бы фунтами было совершенно другим делом, — говорил известный физик Отто Фриш. — Это подобно тому, как если бы врачу, изготовившему с огромным трудом крупицу нового лекарства, сказали: «А теперь, доктор, мы хотели бы иметь его в количествах, достаточных для того, чтобы мостить им улицы».

Ясно, что метод электромагнитного разделения не годится для получения урана-235 в количестве, «достаточном для мощения улиц». Нужно предложить что-то другое. Но что?

Известно, что разница в массе заставляет тяжелые частицы быстрее оседать в жидкости на дно сосуда. Даже в атмосфере происходит частичное разделение газов. Обнаружено, что на больших высотах гелия и во-

дорода, самых легких газов, больше, чем у поверхности Земли.

Если силы тяготения заменить более мощными центробежными силами, можно во много раз усилить этот эффект. Аппарат, в котором производится центробежное разделение,—центрифуга, представляет собой вертикально расположенный цилиндр, вращающийся с большой скоростью. Газ или жидкость в таком цилиндре распределяется так, что в центре давление и плотность меньше, чем на вращающейся стенке. Для более тяжелых молекул разница в давлении и плотности в центре и на периферии несколько больше, чем для легких. Если в центрифугу попадает смесь изотопов, более легкие атомы концентрируются в центральной части, а тяжелые — на периферии.

Работу центрифуги можно улучшить, если пропускать поток газа или пара вниз ближе к стенкам, а вверх — вдоль центральной оси. Тогда пар или газ с легким изотопом можно выводить в верхней части в центре, а с тяжелым — в нижней, ближе к периферии. Применение центрифуг для разделения изотопов урана сулило теоретически неплохие результаты, но для использования этого метода в промышленности понадобились бы сложные установки.

А не окажется ли подходящим для промышленного применения метод термодиффузии. Сущность его состоит в том, что если в сосуд с газообразной смесью вставить нагреваемую спираль и охлажденный змеевик, то легкие молекулы будут концентрироваться около нагретой спирали, а тяжелые — у холодного змеевика. Установку можно упростить и привести ее к вертикальной охлаждаемой трубе, в центре которой протянута накаливаемая до 500°C проволока. Смесью газообразных изотопов вводится в трубку. Легкие атомы собираются в центре

у нагретой проволоки, а тяжелые — у холодной стенки. Поскольку нагретый газ легче, он поднимается вверх, а холодный, более тяжелый газ опускается по стенкам вниз. В 30-х годах XX столетия этим методом удалось разделить изотопы хлора, неона, азота, криптона и т. д. В 40-х годах метод термодиффузии был апробирован на одном предприятии в США для разделения изотопов урана, но он потребовал большего расхода энергии.

В 1955 г. был предложен и испробован метод струйного разделения. Принцип его несложен. Газообразную смесь изотопов нагнетают в камеру и с большой скоростью через сопло выпускают в полость с низким давлением. Здесь струя расщепляется. Легкие, более подвижные атомы диффундируют во внешнюю часть струи, а тяжелые — остаются в центре. Если теперь направить струю в патрубок, который как бы «расщепляет» струю, «вырезая» из нее ядро, насыщенное тяжелым изотопом, можно получить установку, вполне пригодную для промышленного использования. Но она оказалась менее выгодной, чем метод газовой диффузии, с помощью которого физики задолго до появления атомного проекта разделяли газообразные изотопы. А мысль о том, что газовую диффузию можно применить для разделения изотопов урана, пришла в голову Францу Симону.

Говорят, что Симон был единственным офицером британской службы, который был награжден немецким боевым железным крестом. Правда, крест этот был получен им еще в первую мировую войну. Гитлеровский режим заставил его эмигрировать в Англию. Однажды утром Симон появился в лаборатории с кухонным ситом, сделанным из металлической сетки. Показывая на множество мелких дырочек, он заявил сотрудникам: «То, что мы ищем, представляет собой нечто подобное, только с гораздо более мелкими отверстиями».

Действительно, сущность диффузионного метода проста. Если естественный уран в газообразной форме проникает через фильтр с ничтожно малыми отверстиями, то уран-235 пройдет сквозь пористую стенку быстрее, чем уран-238. Газ по другую сторону фильтра будет содержать немного больше урана-235 по сравнению с газом, не прошедшим еще через фильтр. Разница эта мала, но если заставить газ проходить последовательно через большое количество пористых перегородок, то можно получить неплохие результаты.

Правда, число перегородок получается огромным. Для того чтобы увеличить содержание урана-235 в 10 раз, т. е. с 0,72 до 7,2%, требуется около 1900 мембран, а для получения 99% урана-235 число мембран увеличивается до 4000.

Изготовление мембран — дело не простое. Теория показывает, что диаметр отверстий в мембране должен быть около одной стотысячной доли миллиметра. Чтобы получить такие субмикроскопические отверстия, тонкий лист сплава серебра с цинком травят соляной кислотой. Она растворяет атомы цинка, а на их месте остаются мельчайшие отверстия.

Вторая проблема — получение газообразного урана. Выяснилось, что удобнее всего воспользоваться соединением урана с фтором. Дело в том, что у фтора всего один изотоп, и весь ход процесса разделения будет определяться только изотопами урана. Но у гексафторида урана (так называется это соединение) много недостатков. Он химически очень активен, поэтому надо было подумать об антикоррозионных сплавах для труб, сосудов, компрессоров и насосов. В систему не должны попадать воздух и влага, так как, реагируя с ними, гексафторид урана дает порошкообразное соединение, способное закупорить мелкие поры в мембранах. Все трубы и уста-

новки системы необходимо подогреть, чтобы предотвратить конденсацию газа.

Завод в Ок-Ридже, построенный в США для разделения изотопов методом газовой диффузии, огромен. Площадь пористых перегородок составляет сотни гектаров, а трубопроводы, вытянутые в одну линию, составили бы несколько тысяч километров. И тем не менее именно этот метод оказался самым выгодным для промышленного разделения изотопов урана.

Но решить проблему разделения изотопов урана вовсе не значит решить судьбу атомной энергетики. Нельзя забывать и о третьей проблеме — о получении замедлителя и других материалов достаточной чистоты и в нужном количестве. И прежде всего эту проблему следовало решить в отношении самого природного урана, который необходимо выделять из руд.

По технологии, принятой в Англии, урановую руду растворяют в азотной кислоте. Затем, обрабатывая ее эфиром, уранил нитрат отделяют от всех остальных примесей. Из очищенных таким образом солей урана можно получить два продукта: металлический уран и знакомый нам гексафторид урана. Этот газ затем идет на разделительные заводы, где получают ядерное топливо, обогащенное ураном-235.

Металлический же уран подвергают не менее любопытной обработке. Дело в том, что если в начале работы реактора за тонкой алюминиевой или ниобиевой оболочкой тепловыделяющего элемента находится уран-238 и уран-235, то через некоторое время внутри в тех или иных количествах получаются едва ли не все элементы периодической системы. Выбрасывать отработавший стержень было бы накладно. Ведь в нем содержится непрореагировавший, добытый ранее с таким трудом уран-235. Уран-238 тоже не стоит выбрасывать. Хотя он

и мешает протеканию цепной реакции, но поглощенные им нейтроны, если так можно выразиться, не пропадают даром. Они через ряд промежуточных реакций переводят атомы урана-238 в атомы нового, не встречающегося в природе элемента — плутония. А плутоний в отличие от урана-238 может служить ядерным горючим. Значит, из отработавшего стержня необходимо выделить еще и плутоний.

Вот здесь-то и есть где развернуться химикам. Извлеченный из реактора тепловыделяющий элемент погружают в раствор, который растворяет металлическую оболочку. После этого оставшийся уран и продукты его деления растворяют в азотной кислоте. В итоге образуется раствор, в котором содержатся нитраты всех получившихся в результате ядерных реакций элементов. Из этого раствора нитраты урана и плутония удастся выделить с помощью органических растворителей, не смешивающихся с водой. При сливании раствора и смеси трибутилфосфата с керосином соединения урана и плутония через некоторое время переходят из водной среды в органическую. Продукты деления остаются в растворе.

Из органического растворителя нитраты урана и плутония можно извлечь с помощью чистой воды. Чтобы считать операцию законченной, надо сделать еще один шаг — отделить уран от плутония. И здесь снова приходит на помощь органический растворитель. Дело в том, что плутоний легче переходит в наиболее окисленное состояние, чем уран, поэтому его нитрат не растворяется в органическом растворителе. Соединения же урана легко растворяются в нем.

Такая обработка облученных стержней не лишена недостатков, ведь растворение и вторичное выделение твердых веществ сильно удорожает стоимость ядерного

горючего. Поэтому химики предложили еще несколько методов обработки тепловыделяющих элементов. Можно, например, все содержимое стержня превратить в смесь фторидов. Если теперь нагреть такую смесь, летучий гексафторид урана уходит в виде пара, а большая часть продуктов деления остается в твердом осадке. Плутоний, правда, тоже остается в осадке, из которого его выделяют органическим растворителем.

А вот другой процесс, разрабатываемый в химических лабораториях. Если извлеченное из реактора урановое топливо расплавить в присутствии ограниченного количества кислорода, то получаются главным образом устойчивые окислы большинства новых элементов, образовавшихся при облучении. Будучи более легкими, чем расплавленный уран, они всплывают на поверхность в виде шлаков. Отделить уран от шлаков теперь нетрудно. Надо выпускать расплавленный металл через отверстия в днище тигля. Можно сделать иначе. Охладив тигель до комнатной температуры, нетрудно растворить пленку окислов верхней части в азотной кислоте, тогда в тигле останется чистый уран.

Элементы, которые не образуют окислов, тоже можно удалять из урана. Например, цезий при высоких температурах улетучивается, теллур, сплавляясь с редкоземельными элементами, уходит в шлак, так же как и цирконий, который образует карбид циркония.

Исследован в лаборатории еще один метод, с помощью которого можно отделять плутоний от облученного урана. Если в тигель с расплавленным ураном вылить такое же по весу количество расплавленной соли — тетрафторида урана, то через некоторое время из металла около 90% плутония перейдет в соль. Этот процесс так и называется — экстракция (извлечение) расплавленными солями. Оказывается, не только тетрафто-

рид урана может извлекать плутоний из расплавленного уранового топлива. Не хуже соли эту задачу выполняет серебро. В смеси расплава облученного урана и серебра плутоний через некоторое время образует раствор в серебре. Но хотя серебро и хорошо «отсасывает» плутоний, у него есть немало недостатков. Оно слишком хорошо поглощает медленные нейтроны, поэтому ядерное топливо, разделенное с помощью серебра, приходится подвергать дорогостоящей тщательной очистке.

С этой точки зрения магний, который хуже растворяет плутоний, оказывается экономически более выгодным. Он не требует столь тщательной очистки. Экстракция жидкими металлами — не освоенный промышленностью процесс, она находится еще в стадии изучения.

Разработка этих и новых методов разделения различных элементов не менее важна, чем изобретение новых способов разделения изотопов. Дело в том, что ядерные реакции открывают перед химиками любопытные возможности. Мы уже говорили, что изотопы, не отличающиеся по химическим свойствам, наделены различными ядерными свойствами. Поэтому вместо того, чтобы с большим трудом и затратами разделять изотопы, можно пойти другим путем: взять какой-либо элемент, пусть даже смешанный с другими, и облучить его нейтронами. Тогда в результате ядерных превращений один изотоп превратится в новый химический элемент, а другой — нет. Такую смесь можно разделять методами, хорошо освоенными химической технологией.

Скажем, в природной воде есть в ничтожных количествах еще один изотоп водорода — тритий. Концентрация трития так мала, что выделение его из природной воды стоило бы огромных денег, а тритий очень нужен — ведь он самое лучшее топливо для термоядерных установок.

Наилучшим методом промышленного получения трития оказалось не разделение изотопов, а ядерные реакции. Для этого соединения лития облучают медленными нейтронами. Один из изотопов этого металла — литий-6 превращается в газообразный тритий, отделение которого производят простой откачкой.

Ядерные реакции с изотопами и последующее химическое разделение — совершенно новое направление в технологии.

Итак, плутоний, уран-238 и уран-235 из материала отработавших стержней удален. Что же осталось? Остались растворы, содержащие соли и другие соединения элементов, получившихся при облучении. Эти растворы, образно выражаясь, — «дым» атомной топки. И если сейчас серьезно и остро ставятся проблемы очистки промышленных отходов, то это требование в еще большей степени приложимо к отходам атомной промышленности.

Ведь эти отходы содержат долгоживущие радиоактивные вещества, которые, будучи выброшены в атмосферу или в реки, могут принести непоправимый вред. Подсчитано, что если бы потребности США в энергии удовлетворялись за счет ядерных реакторов, то было бы необходимо удалить столько радиоактивных продуктов деления, сколько их образуется при взрыве 200 тыс. атомных бомб!

Проблема очистки «дыма» для атомной энергетики может в скором будущем оказаться первоочередной. Уже сейчас остро стоит вопрос: куда девать радиоактивные отходы? Считается, что наилучший метод концентрирования продуктов деления — упаривание их досуха и перевод смеси нитратов в окислы — кальцинирование. Сами эти осадки требуется теперь надежно захоронить в специально для этой цели созданные «могильники».

Есть и другие пути: продукты распада можно перевести в твердое, стекловидное состояние и таким образом еще более полно изолировать от внешней среды. Эти отходы можно помещать в замкнутые геологические полости, не имеющие выхода на поверхность: например, в нефтяные пласты, из которых откачана нефть.

В удалении радиоактивных веществ из отходов атомной промышленности ведущая роль принадлежит химикам.

Но проблемы, связанные так или иначе с ядерным топливом и с продуктами его деления и обработки, далеко не исчерпывают круга вопросов, которые атомная промышленность ставит перед химиками. Нельзя забывать и о замедлителе, и о других материалах «достаточной чистоты».

Сначала о замедлителе. Уран-235 лучше расщепляется медленно движущимися нейтронами. А при делении ядра нейтроны вылетают из него с очень большой скоростью. Их так и называют — быстрые нейтроны. Для того чтобы замедлить их движение в ядерном реакторе, нужен замедлитель. Сталкиваясь с молекулами или атомами замедлителя, нейтроны отдают им свою энергию, и движение их снижается до нужных скоростей. Но вот в чем сложность. Замедлитель может не только тормозить нейтроны, он может и поглощать их, препятствуя протеканию ядерной цепной реакции. Поэтому к любому веществу, используемому в качестве замедлителя, предъявляются два требования — они должны хорошо замедлять нейтроны и мало поглощать их. Хорошими замедлителями считают тяжелую воду, графит, бериллий и его окись. Ясно, что малейшие примеси очень сильно влияют на замедляющие свойства этих веществ. Скажем, малейшая примесь бора может «отравить» самый лучший замедлитель, так как бор очень хорошо

поглощает медленные нейтроны и останавливает цепную реакцию. Таким же свойством обладает кадмий. Поэтому эти элементы обычно используют для регулирования цепной реакции в ядерных реакторах. Вводя в активную зону стержни из бора или кадмия, мы можем снижать мощность реактора или совсем выключать его.

Кроме этих веществ, в активной зоне должен быть теплоноситель, отводящий теплоту, возникающую в результате ядерной реакции. Чаще всего для этой цели используют воду, жидкие металлы, газы, реже — органические жидкости.

И, наконец, в активной зоне находятся металлы, вроде алюминия, циркония, ниобия, из которых могут быть изготовлены оболочки, предотвращающие коррозию и вымывание ядерного топлива потоком теплоносителя.

Надо ли говорить, что к степени химической очистки этих веществ предъявляются самые жесткие требования. Но этого мало, ядерные реакции оказались весьма чувствительными даже к атомам изотопа этого же химического элемента.

Долгое время химики мало интересовались существованием и поведением изотопов. Их нисколько не беспокоило, что сверхчистые реактивы содержат смесь изотопов. Ведь в химических реакциях все изотопы какого-либо элемента ведут себя совершенно одинаково. В ядерных реакциях положение другое. Изотопы одного и того же химического элемента по ядерным свойствам могут различаться не меньше, чем элементы из разных групп периодической системы. Поэтому как в химии иногда нельзя применять загрязненные примесями вещества, так и в ядерных реакциях нередко приходится очищать нужный нам изотоп от других изотопов того же элемента.

Вспомните, всего 3 нейтрона отличают уран-235 от урана-238. Тем не менее их ядерные свойства различаются очень сильно. Уран-235 — ценнейшее ядерное горючее, а уран-238 — нет. Один лишний нейтрон в ядре водорода делает соединение тяжелого водорода — дейтерия — воду самым лучшим замедлителем. Тяжелый изотоп водорода меньше поглощает нейтроны, чем обычный водород.

Из двух изотопов бора только один — бор-10 сильно поглощает медленные нейтроны, поэтому, выделив из природного бора только этот изотоп, можно изготовить из него чрезвычайно эффективные и компактные стержни. А удалив из природного лития 7,5% изотопа литий-6, который сильно поглощает нейтроны, нетрудно получить более совершенный жидкометаллический теплоноситель, чем, скажем, природный литий.

Короче говоря, ядерная энергетика перевела проблему получения сверхчистых веществ в совершенно новую плоскость. Она потребовала не только химически чистых веществ, но и «изотопически» чистых элементов. Промышленное разделение изотопов урана дало богатый опыт в этом смысле. И хотя сейчас чистые изотопы «других материалов» практически не производятся, создание новых совершенных атомных установок, вероятно, приведет к промышленному производству чистых изотопов бора, лития, железа и т. д.

Но, конечно, не только изотопы урана разделяются сегодня в промышленном масштабе. Больше того, первая промышленная установка по разделению изотопов была построена в Норвегии еще до того, как ученые начали работать над атомным проектом. Эта установка производила тяжелую воду — соединение дейтерия с кислородом. До войны единственными потребителями тяжелой воды были научные лаборатории.

Поскольку атомные веса изотопов водорода отличаются почти в два раза, различия в их физических свойствах столь велики, что для разделения водорода и дейтерия можно использовать методы, оказывающиеся неэффективными для урана или других изотопов. Например, при электролизе воды легкий изотоп на катоде выделяется быстрее, чем дейтерий. Поэтому при длительном электролизе в остатке накапливается именно тяжелая вода.

Были изучены и другие методы разделения изотопов водорода. Например, при испарении жидкого водорода быстрее улетучивается легкий изотоп, а дейтерий концентрируется в осадке. Примерно то же самое наблюдается и при испарении обычной воды, в которой содержится 0,016% тяжелой воды.

Но самым выгодным для промышленного использования оказался так называемый метод изотопного обмена. Хотя химические свойства тяжелого и легкого водорода одинаковы, большая разница в атомном весе приводит к тому, что они вступают в химические реакции с разной скоростью. Это различие и можно использовать для их разделения.

Например, в колонне, в которой сверху стекает вода при температуре 25—30°C, а снизу поднимается сероводород, происходит так называемый изотопный обмен. Дейтерий, содержащийся в молекулах сероводорода, переходит в воду, а его место занимает обычный водород из воды. Из колонны выходит вода, обогащенная тяжелым водородом. Одна часть ее идет на дальнейшую обработку, а другая — поступает в горячую колонну (100°C). Здесь происходит обратный процесс: дейтерий при высокой температуре переходит в сероводород, а вода с незначительным содержанием дейтерия выводится из реакции. Таким образом, сернистый водород дейст-

вует как носитель дейтерия и его количество остается неизменным. А непрерывно поступающая вода разделяется на две части: одна — обогащенная дейтерием, а другая — обедненная им.

Простой перечень процессов разделения оказался весьма обширным. Каждый процесс имеет свою теорию, свои аппараты, свои особенности. Возникает проблема: каким образом из множества разных способов разделения смесей выделять наиболее эффективный? Возникает и вторая проблема: радиоактивные изотопы опасны для людей — как сделать процессы разделения, контролируемые и управляемые без вмешательства человека?

Решение этих проблем и составило один из краеугольных камней химической кибернетики.

КИБЕРНЕТИКА И... КОФЕ

Было бы неправильно думать, что разделение веществ характерно только для атомной промышленности.

Атомная энергетика — это своего рода апофеоз разделительных процессов. Именно она дала толчок разработке процессов и теорий, которые могут найти себе применение в самых различных отраслях производства. В атомной промышленности приходится заниматься всеми видами разделения: и выделением ничтожных примесей из основного материала, как в сверхчистом графите, и скрупулезным извлечением из огромной массы руды рассеянных изотопов и редких элементов, и очисткой отходов атомных заводов от опасных радиоактивных веществ, и обработкой извлеченных из реакторов рабочих стержней, в которых в результате ядерных реакций получились новые, уже не встречающиеся в природе радиоактивные элементы.

Мы отвели такое большое место описанию химических процессов в атомной энергетике только потому, что во всех других отраслях химической промышленности инженерам и ученым приходится решать в принципе такие же задачи.

Как известно, кибернетика — это наука об управлении. Но почему же о ней заговорили сравнительно недавно, почему она появилась на белый свет каких-нибудь 15—20 лет назад? Ведь управление производственными процессами требовалось всегда, ведь химическая технология, появившаяся гораздо раньше кибернетики, тоже всегда требовала управления. Чтобы уяснить себе этот вопрос, попытаемся проиллюстрировать его несложным примером.

В прозрачной колбе стеклянного кофейника, поставленного на деревянную плиту, заклокотала, пошла пузырями кипящая вода. Хозяйка всыпала туда размолотые зерна, и через несколько минут кофе готов. Самый внимательный наблюдатель, да и сама хозяйка должны будут согласиться с тем, что приготовление этого напитка особого труда не составляет.

Однако попробуйте автоматизировать такой процесс приготовления кофе, и вы столкнетесь с трудностями там, где совершенно их не ожидали. Ведь многие операции хозяйка выполняет почти автоматически, не замечая их. Нетрудно, конечно, вскипятить воду или всыпать кофе. Но предварительно нужно определить его качество.

Во время варки нужно следить за цветом, вкусом и запахом напитка. В зависимости от сорта кофе, жара пламени и других условий нужно выбирать время варки и последовательность операций.

Конечно, далеко не каждая хозяйка выполняет определенные требования, нередко она просто прикидывает

«на глазок», опираясь на свой опыт. Впрочем, если она и допустит ошибку, то потеря невелика: пол-литра или литр кофе.

Но варить таким способом тысячу или несколько тысяч литров кофе уже не годится. Во-первых, никакой хозяйке не справиться с такой задачей, если решать ее старыми методами. Легко поставить на плиту небольшой кофейник, но как обращаться со сто- или тысячелитровым гигантом? Тяжело с тысячелитровыми кофейниками — вместо них используют небольшие змеевики, через которые непрерывно прокачивают воду. Слишком много нужно людей для обслуживания большой установки — их заменяют автоматами.

Чтобы автомат хорошо и надежно работал, нужно дать ему четкое задание на то, что и как он должен выполнять: автомат не может работать «на глазок», как хозяйка, у него нет ее опыта. Поэтому прежде всего установим, чем определяют качество приготовленного кофе?

Не нужно быть большим знатоком, чтобы предпочесть чашку горячего натурального кофе такой же чашке ячменного. Качество приготовляемого напитка зависит в первую очередь от качества исходных продуктов: кофе, воды, сахара. Всякий согласится и с тем, что предлагаемый Марком Твеном немецкий рецепт, по которому на бочку воды берется одно кофейное зерно, тоже вряд ли может пользоваться успехом. Значит, на качество кофе, кроме качества исходных продуктов, влияет еще их пропорция. Однако переваренный напиток, приготовленный из лучших продуктов и составленный по прекрасной рецептуре, тоже не может претендовать на высокую оценку. Значит, при варке кофе нужно учитывать еще один фактор — условия протекания процесса.

Хозяйка, занятая приготовлением кофе, иногда бессознательно выполняет все три операции. Качество исходных продуктов она определяет с помощью органов чувств, рецептуру получает либо из какой-нибудь книги, либо на основе собственных изысканий и контролирует процесс опять же с помощью органов чувств. Автоматическая кофеварка должна все эти операции выполнять сама. Создать такую машину сейчас, когда автоматическими линиями и цехами уже никого не удивишь, пожалуй, нетрудно. Для этого в ответственных частях установки нужно поставить приборы, которые следили бы за уровнем, цветом и концентрацией кофе и поддерживали бы их в определенных границах. Ведь именно так и действуют даже самые опытные хозяйки: увидев, что кофе выкипает, они уменьшают подачу газа. Соединив автоматическими связями отдельные узлы установки, можно создать настоящий «кофейный» автомат.

Так приготовление кофе, несложное в домашней обстановке, может быть настоящей инженерной проблемой, когда речь идет о приготовлении большого количества этого напитка. Точно такие же проблемы стоят и перед химическим производством, только продукция его исчисляется не тоннами, а десятками и сотнями тысяч тонн самого разнообразного материала, начиная от нашатырного спирта и кончая каучуком и капроном. И если качество кофе — это что-то такое, что мы сами не можем даже точно выразить, то качество химической продукции выражается весьма реально: в дополнительных тысячах километров пробега, в сверхплановых тканях и продуктах, в облегчении и удешевлении машин, отделочных и строительных материалов. Поэтому не удивительно, что на повестку дня встал вопрос об использовании кибернетики в химической промышленности.

На первый взгляд может показаться, что автоматизация химического производства в принципе мало чем отличается от автоматизации в машиностроении или в энергетике. Не все ли равно, что автоматизировать — станок, котел, турбину или автоклав. Оказывается, нет. В энергетике «качество» электроэнергии не зависит от того, сжигается ли в топке нефть или торф, чистая или грязная вода подается в котел. Качество продукции машиностроительного завода определяется точностью и чистотой обработки деталей и может меняться «дискретно» — прерывисто от детали к детали. На химическом предприятии положение иное. Здесь качество продукции, так же как и качество кофе, определяется тремя факторами: качеством исходных продуктов, пропорцией и условиями выполнения технологического процесса. Любое отклонение от нормы в каждом из факторов приводит к изменению качества продукции. Простая замена людей автоматами, которые будут поддерживать в заданных пределах температуры, давление и расходы материалов в разных частях установки, не позволит выполнить основную задачу — получение продукта с максимально высоким качеством. Такая задача предполагает возможность учета основных факторов, влияющих на качество и разработку алгоритма, т. е. программы управления предприятием.

Инженер, автоматизирующий химическое производство, должен создать такую систему автоматического управления, которая бы обеспечивала выпуск нужного количества и качества химической продукции при минимальных затратах.

ЧТО ТАКОЕ ХОРОШО И ЧТО ТАКОЕ ПЛОХО?

Итак, мы выяснили, что делать специалисту по химической кибернетике. Но этого мало. Надо знать еще, как работать. Мы говорим «вкусный кофе», «качество химической продукции», интуитивно понимая, о чем идет речь. Но ведь электронная машина, которую мы хотим заставить управлять производством, не имеет этой интуиции. Для того чтобы сравнить кофе, полимеры или реактивы нескольких сортов, необходимо найти объективные меры для такой оценки, выражаемые в цифрах. Кроме этих величин, необходимо знать и некоторые другие величины, характеризующие процесс. Какие?

Это можно пояснить на примере.

Мы уже говорили, что кибернетика — это наука об управлении. Главный объект ее изучения — машины. Под этим словом в кибернетике понимается любое устройство, выполняющее некоторые операции. Поэтому наличие вращающихся шестеренок, тяжелых маховиков роторов, кривошипов вовсе не обязательно для устройств, которые кибернетика именует машинами.

Машины, выполняющие операцию, скажем, разделения, очень распространены даже в обыденной жизни. На примере обычной веялки можно разобрать принцип любого разделительного устройства, начиная от драги, которая промывает золото, до радиолокатора, который выделяет сигнал из посторонних шумов. Такие машины не создают новых веществ: все, что направлено внутрь веялки, выходит из нее, но выходит в разных местах. В каждой разделительной машине есть место, через которое она загружается смесью. Это место называют входом.

Те места, из которых выходят продукты, отличающиеся по составу от исходных, называют выходом. Кроме того, для работы веялки нужна мощность, без которой она не может производить разделение. Две веялки, которые имеют одинаковые исходные и конечные продукты, могут заметно отличаться по производительности: одна перерабатывает 1 т зерна в 1 ч, а другая только 50 кг. Поэтому, чтобы полностью определить задачу, следует указать величину потока зерна, поступающего в веялку, и потоков, покидающих ее.

Вот и все данные, которые полностью характеризуют работу веялки, и не только веялки, но и любой разделительной установки. Возьмите рудник. Как известно, руда в природе залегает вместе с пустой породой, т. е. породой, где содержание полезного металла ниже допустимого. Очевидно, часть добываемой породы, которая содержит нужное количество полезного металла, выходит с рудника на фабрику. Вторая часть, в которой содержание полезного металла ниже нормы, идет в отвал. Если принять массу вынимаемого материала за массу входящего потока, а среднее содержание металла и пустой породы за численное значение состава смеси, то мы увидим, что схематическое изображение веялки ничем не отличается от схематического изображения целого рудника. Ведь руду, направляемую на обогатительную фабрику, мы можем считать первым выходящим потоком и определять ее качество по содержанию полезных и бесполезных компонентов. Точно так же можно задать и поток, идущий в отвал. Правда, необходимая на такое разделение мощность в этом случае трудно поддается прямому определению.

Подобным же образом можно рассматривать колонну для дистилляции или экстракционную колонну. Да и вообще говоря, нет такой реальной разделительной

установки, работа которой не могла бы быть выражена с помощью перечня цифр.

Значит, электронная счетная машина может осуществлять контроль и управление разделительной установкой, основываясь на объективных, точных цифрах. Но как сможет она выбирать тот или иной режим? Какому режиму она должна будет отдавать предпочтение? Как ей оценивать разделительную мощность, о которой мы деликатно заметили, что она «трудно поддается прямому определению»? Наконец, какое управление признать наилучшим, что считать идеальным процессом управления?

Как это ни странно, но на последний вопрос ответить почти так же трудно, как на известное пушкинское замечание «Можно ли сказать, что хороший завтрак лучше дурной погоды».

Конечно, если две хозяйки варят одинаковое по количеству и качеству кофе, но первой требуются продукты более низкого качества, чем второй, ответ ясен: первая варит лучше.

Но в большинстве случаев дать такой однозначный ответ невозможно. В самом деле, как оценить работу хозяек, если для приготовления одинакового количества кофе одна требует более высокого качества зерен, зато другая варит быстрее и тратит на приготовление меньше энергии. Или из одинаковых продуктов одна хозяйка варит кофе худшего качества, чем другая, но зато больше. Можно ли в таких условиях однозначно определить, что лучше?

Оказывается, можно. Ведь кофе, сахар, топливо и т. д. хозяйка получает не бесплатно, следовательно, мерилom оценки здесь будет стоимость кофе. Таким же образом, сводя стоимость всех составляющих к денежному выражению, мы можем для каждого случая опре-

делить стоимость производимого продукта. Высчитав общие затраты и разделив их на количество произведенного продукта, мы находим мерило, с помощью которого можем сравнивать эффективность работы химических предприятий, точно так же, как это делается в энергетике. Ведь чем дешевле обходится киловатт-час на электростанции, тем экономичнее она работает, независимо от того, как она устроена, что сжигает в топке и т. д. Точно так же и управление химическим предприятием по производству, например, аммиака будет наилучшим, если при минимальных затратах мы получим максимальное количество дешевого аммиака.

Химик должен стремиться создать такой режим производства, при котором каждый килограмм выпускаемой продукции будет иметь минимальную стоимость.

Как же выбрать такой режим?

В последние годы развилась математическая теория стратегических игр. Анализируя ситуации, которые возникают при столкновении противоположных интересов в играх, удалось построить строгую математическую теорию таких ситуаций. Каждый инженер-химик, каждый исследователь, приступая к решению задачи, также планирует свою программу деятельности, т. е. планирует, говоря на языке теории игр, свою стратегию.

Сама деятельность химической промышленности может рассматриваться как пример игры двух лиц, где в качестве второго партнера в игре выступает природа. В таком случае выигрыш одного партнера равен проигрышу другого.

Интересно выяснить, что же составляет «ставки» в такой игре. Инженер-химик для получения аммиака должен взять некоторое количество азота и водорода. Получить аммиака больше, чем взято исходных веществ, химик не может. Однако превратить в аммиак не все

исходные вещества — значит потерять часть продуктов. Этот проигрыш химика и будет выигрышем природы. С другой стороны, для получения аммиака недостаточно взять лишь вещества, входящие в состав его молекулы. Необходима еще энергия. Лишь часть израсходованной энергии превращается в полезную работу химической реакции. Потеря энергии при этом — проигрыш химика и выигрыш его противника — природы. Надо найти такой режим работы предприятия, когда потери в денежном выражении будут минимальны.

Для решения этой задачи нам нужны уже конкретные сведения о процессе: какое количество каждого вещества поступает в процесс каждую минуту; какова стоимость каждого вещества, поступающего в процесс; какова общая стоимость сырья, потребляемого в течение 1 часа. Именно эти сведения и должны быть получены приборами. Электронная вычислительная машина может быстро перемножить расход сырья на его стоимость и просуммировать все расходы. Полученный результат дает значение стоимости материалов при данном режиме работы установки. Произведя подобный расчет по всем видам энергии, найдем отпускную стоимость, после чего вычислим полный расход при данном режиме работы установки.

Теперь нам надо определить наилучший или оптимальный режим работы установки. Допустим, что в первую минуту стоимость всех затрат составляет 40 руб., при этом было получено 800 кг аммиака. Разделив затраты установки в 1 час на количество созданного продукта, мы получаем число, характеризующее качество работы установки, т. е. себестоимость продукции. При другом режиме работы установки могло оказаться, что расходы в 1 час составляли 44 руб., однако установка дала 900 кг аммиака. Очевидно, что второй режим

работы установки лучше, чем первый. Отличить лучший режим от худшего может электронная машина и без помощи человека при условии, что машине указано, как и что нужно вычислять.

Таким образом, оптимальная стратегия оказалась на предприятии химической промышленности тем режимом, при котором общие потери в денежном выражении оказались минимальными. Алгоритм управления предприятием химической промышленности сводится к нахождению минимума затрат на единицу продукции.

Однако в рассмотренном нами примере мы полагали, что качество аммиака в обоих случаях одинаково. Практически же это не так. Хозяйка может сварить кофе по немецкому способу, и стоимость литра будет небольшой, но вряд ли это лучше, чем высокая стоимость качественного, хорошего напитка. Значит, мало свести дело к денежному выражению. Необходимо еще выдерживать одинаковое качество производимой продукции. Но даже и в этом случае вопрос не решается однозначно. Что из того, что химическое предприятие по очень низкой цене выпускает продукцию такого качества, которое никого не устраивает? Что из того, если химический завод выпускает очень много дешевой продукции одного качества, но не удовлетворяет промышленность необходимым минимумом продукции иного качества? Несмотря ни на что, работа таких предприятий будет нерентабельна. Выход из положения один — строго задавать химической промышленности необходимый минимум продукции тех или иных сортов. Химические заводы должны давать продукцию по минимальной цене. Для этого необходимо строго научно разрабатывать производственные программы, которые увязывают проблемы химической кибернетики с более широким кругом проблем, решаемых планированием народного хозяйства.

А теперь попробуем проследить в деталях, как надо управлять химическими предприятиями, как надо рассчитывать наилучшие варианты будущих заводов и режимов.

ЧТО ДЕЛАТЬ И КАК ДЕЛАТЬ!

Мы не чувствуем, как работает наше сердце. Это нормальное явление. Народное хозяйство тоже не ощущает хорошей работы отдельной отрасли промышленности. Но если у нас заболело сердце, мы начинаем ощущать его работу, мы можем почувствовать, что оно работает с перебоями. Так же обстоит дело и с работой промышленности.

Мы не замечаем работу электростанции, если она работает. Но если вечером начинает плохо работать телевизор или уменьшается накал лампочки, то мы можем сделать вывод, что станция перегружена и напряжение в сети падает.

Нормальная работа народного хозяйства требует того, что в электротехнике называют согласованием мощностей и нагрузок. Все источники вырабатывают энергии столько, сколько требуют потребители. На общепринятом же языке это называют пропорциональным развитием всех отраслей промышленности. Поэтому оценивать эффективность работы предприятия, в том числе и химического, следует с точки зрения всего народного хозяйства.

В качестве примера рассмотрим работу завода, выпускающего каучук. Допустим, что завод может выпускать 1000 т каучука с затратами 200 руб. за 1 т и 1500 т каучука с затратами 250 руб. за 1 т. Какой из этих

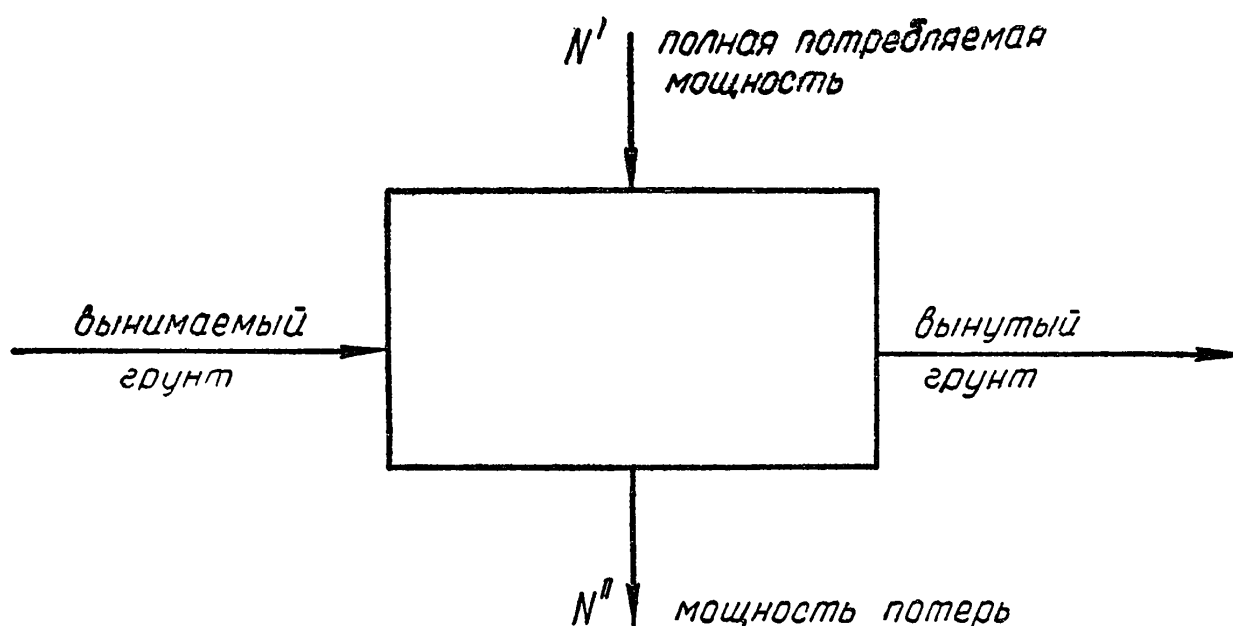
режимов считать экономически более выгодным? Как должно работать предприятие?

Ответить на эти вопросы, основываясь только на выше перечисленных данных, невозможно.

Любой завод — лишь клеточка сложного общественного организма, и его режим следует выбирать в зависимости от требований всего народного хозяйства. В самом деле, если к уборочной кампании на юге не готовы автомашины из-за отсутствия автопокрышек, то выпуск малого количества каучука с малой себестоимостью приведет к такому ущербу для страны из-за потерь зерна, что этот режим нельзя назвать наилучшим. Наоборот, если на складах лежит избыток автопокрышек, то будет совершенно неразумным выпускать много каучука по столь высокой цене. Вот почему, даже если нам полностью все известно о технологическом процессе производства каучука, даже если по желанию можем выбрать наилучший режим работы, мы не можем сказать, что такое хорошо и что такое плохо.

В настоящее время в Совете по кибернетике при президиуме АН СССР успешно ведутся работы по изучению сверхбольших систем, включающих в качестве составных частей целые отрасли народного хозяйства. Когда такие системы, моделирующие все народное хозяйство в целом, будут созданы для каждого завода, фабрики, шахты или строительства, нетрудно будет определить наилучший режим работы. И вот тогда-то руководителям каждого предприятия придется решать другую проблему: как достичь заданного результата с минимальными затратами?

Эту проблему можно назвать проблемой максимального коэффициента совершенства технологии. Разъяснить ее мы попытаемся на простом примере (рис. 1). Уподобим наше предприятие землекопу, который роет лопа-



$$\text{Полезный результат} = \text{АкГм} = (N' - N'') \times t = N' \cdot \eta \cdot t$$

где t — время

$$\frac{N' - N''}{N'} = \eta \quad \text{— обобщенный коэффициент полезного действия}$$

$N' - N''$ — полезная мощность

Рис. 1.

той яму. Не вдаваясь в механизм действия землекопа, мы можем представить его в виде «машины», на «входе» которой вынимаемый грунт, а на «выходе» — уже вынутый. «Выход» выражает полезную работу землекопа в килограммометрах. Кроме входа и выхода, в нашем примере необходимо учесть подвод полной физиологической мощности и отвод потерь на побочные движения и основной обмен веществ. Нетрудно заметить, что величина полезной мощности или производительности труда

зависит от двух факторов: от полной мощности землекопа и от величины полезной мощности, которая равна разности между полной мощностью и мощностью потерь.

Действительно, сокращение бесполезных движений значительно повышает производительность труда. Сокращение простоев, т. е. увеличение средней полной мощности, также сказывается на повышении производительности труда. Эти два элемента: полная мощность и величина доли полезной мощности — могут быть обнаружены в любом технологическом процессе. Если полная мощность, которая потребляется предприятием, уже задана, то технологическое усовершенствование прямо или косвенно всегда связано с повышением коэффициента совершенства технологии.

В обыденной жизни увеличение коэффициента совершенства технологии называют отысканием скрытых резервов. Если бы все предприятия расходовали на получение продуктов только такое количество энергии, которое необходимо теоретически, то никто и никогда не нашел бы скрытых резервов. Следовательно, скрытые резервы — это скрытая техническая отсталость, которую мы при данном уровне техники еще не в состоянии преодолеть.

Внимательный читатель обнаружит, что мы ведем речь только о потоках энергии и не учитываем потоков сырья, материалов и реактивов. Делается это не случайно. Ведь для получения различных веществ мы должны были когда-то раньше затратить энергию. Поэтому любой материальный поток можно считать эквивалентным потоку той энергии, которую мы ранее затратили на получение данного вещества, т. е. на его добычу, переработку и перевозку.

Чтобы не быть голословным, покажем, как нужно выбирать оптимальные режимы работы химических пред-

приятый. Рассмотрим в качестве примера проектирование завода по производству урана-235, который является топливом для атомных электростанций.

Разделение изотопов урана может быть выполнено многими способами: дистилляцией, термодиффузией и в газовых центрифугах. Каждый вид аппарата, рассматриваемый с точки зрения использования в разделительных установках, может быть охарактеризован величиной делительной мощности, т. е. полезной мощности, требуемой для разделения.

Делительная мощность аналогична полезной мощности землекопа, но если работа последнего приводит к изменению высоты грунта, то работа любой разделительной установки приводит к изменению так называемого разделительного потенциала (рис. 2). Это понятие было введено Дираком и Коэном. Величина разделительного потенциала, зависящая только от доли полезного компонента в смеси, точно рассчитана. Зная разделительный потенциал, величину потоков, нетрудно вычислить делительную мощность на входе и выходе разделительной установки. А отсюда ясно, что между землекопом и разделительной установкой существует полная аналогия.

Кроме входных и выходных потоков, к таким установкам подводится полная потребляемая мощность, часть которой идет на потери и выводится из установки, а оставшаяся часть и есть полезная, или делительная, мощность. Ясно, что, уменьшая потери при заданном подводе мощности, мы увеличиваем делительную мощность, которую можно использовать в данной установке. Но, с другой стороны, величина делительной мощности определяется только составом и потоком продуктов на входе и выходе. Поэтому уменьшение потерь позволит нам при прочих неиз-

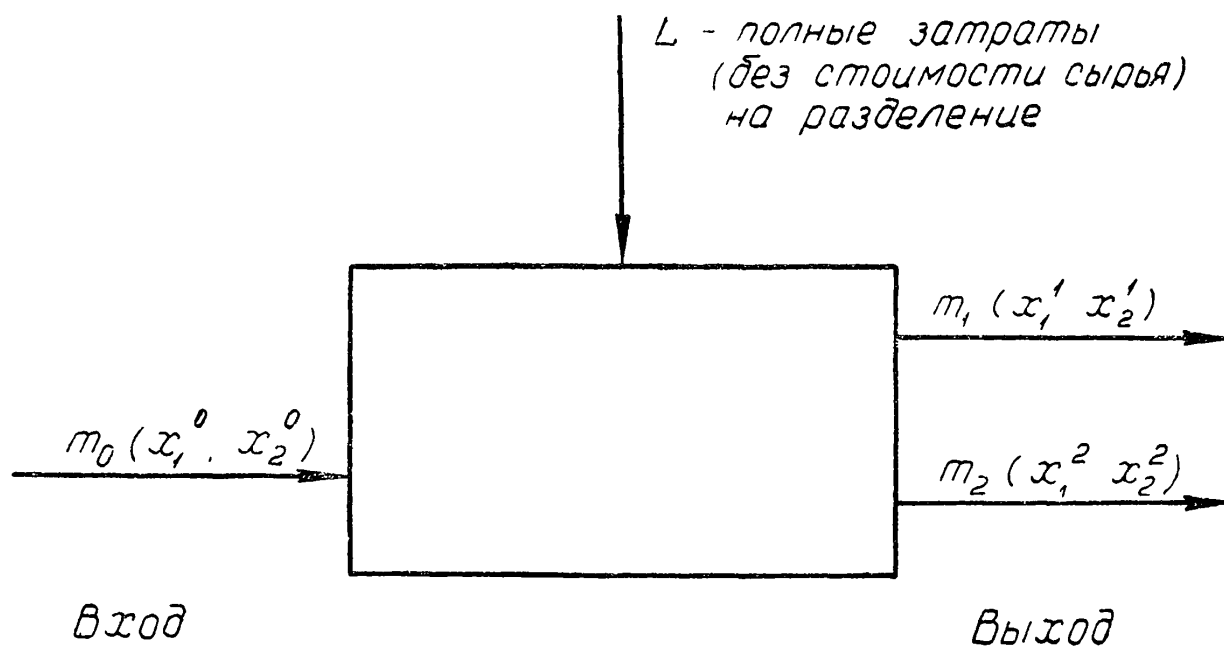


Рис. 2.

Правила оптимизации и перечень контролируемых величин:

L — суммарные затраты на работу разделительного устройства;
 l — цена единицы исходного сырья.

Вход установки

m_0 — поток вещества в установку (кг/ч, т/ч);
 x_1^0 — доля первого компонента смеси в исходном продукте;
 $x_2^0 = 1 - x_1^0$ — доля второго компонента смеси в исходном продукте.

Выход установки

m_1 — поток вещества с первого выхода установки (кг/ч, т/ч);
 x_1^1 — доля первого компонента в потоке первого выхода установки;
 $x_2^1 = 1 - x_1^1$ — доля второго компонента в потоке первого выхода установки;
 $m_2 = m_0 - m_1$ — поток вещества со второго выхода установки (кг/ч, т/ч);

x_1^2 — доля первого компонента в потоке со второго выхода установки;
 $x_2^2 = 1 - x_1^2$ — доля второго компонента со второго выхода установки.

Разделительный потенциал

$$\Phi(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1-x}.$$

Разделительный потенциал исходной смеси

$$\Phi(x_1^0) = (2x_1^0 - 1) \ln \frac{x_1^0}{1-x_1^0}.$$

Разделительный потенциал продукта с первого выхода

$$\Phi(x_1^1) = (2x_1^1 - 1) \ln \frac{x_1^1}{1-x_1^1}.$$

Разделительный потенциал продукта со второго выхода

$$\Phi(x_1^2) = (2x_1^2 - 1) \ln \frac{x_1^2}{1-x_1^2}.$$

Делительная мощность

$$N = m_1 \Phi(x_1^1) + m_2 \Phi(x_1^2) - m_0 \Phi(x_1^0).$$

Себестоимость единицы делительной мощности

$$C = \frac{L}{N} = \frac{L}{m_1 \Phi(x_1^1) + m_2 \Phi(x_1^2) - m_0 \Phi(x_1^0)}.$$

Себестоимость единицы продукта (m_1) при заданном содержании основного компонента (x_1^1)

$$Sm_1 x_1^1 = \frac{L + m_0 l}{m_1}.$$

Разница между себестоимостью продукта и оптовой отпускной ценой (Π) образует прибыль предприятия.

$$\text{Пр.} = m_1 (\Pi - S).$$

Добиваясь максимальной прибыли в час, машина управляет процессом.

менных условиях увеличить производительность установки. Пояснить эту зависимость можно простым примером из механики.

Имеется подъемный механизм, который потребляет мощность 5 л. с. Бесполезные потери на трение составляют в нем 3 л. с. Полезная мощность равна 2 л. с., или 150 кгм/сек. Этот подъемник может поднимать разные грузы, но величина скорости подъема окажется зависимой от величины груза. Груз весом 150 кг будет подниматься со скоростью 1 м/сек, груз 15 кг — 10 м/сек. Тем не менее при самых различных грузах полезная мощность подъемника сохраняет постоянное значение — 2 л. с., или 150 кгм/сек.

После обследования механиком и внесения некоторых изменений в механизм этот подъемник может быть улучшен — его полезная мощность может быть доведена до 175 кгм/сек. Это изменение полезной мощности изменит скорость подъема всех перечисленных грузов.

Теперь попробуем составить проект завода, который будет производить разделение изотопов урана. Природный уран содержит 0,72% изотопа урана-235 и 99,28% изотопа урана-238. Из этого сырья нам нужно получать 1 кг в сутки 90% концентрата урана-235. Степень извлечения урана-235 из исходного материала примем равной 50%, т. е. в отходах содержание урана-235 будет составлять 0,36%. Эти данные соответствуют реальному содержанию урана в природе.

Первый этап расчета сводится к определению полной величины потока сырья, необходимого нашему заводу в сутки. Так как из каждого килограмма сырья извлекается 3,6 г нужного нам изотопа, а в сутки с готовым продуктом выходит 900 г (1 кг с 90% содержанием урана-235), то количество сырья будет равно 250 кг в сутки или 10,4 кг/ч.

Часовой выход готового концентрата урана будет составлять 24-ю часть от суточного выпуска, т. е. 0,042 кг/ч. Часовой выход отвального продукта практически равен величине питающего потока, так как 10,4 кг питания теряют лишь 0,042 кг на готовый продукт. Отсюда нетрудно вычислить необходимую делительную мощность.

Для нашего завода в предположении, что потерь нет, она должна быть равна 7,56 кг/ч. Округленно мы можем принять величину делительной мощности, необходимой предприятию, равной 8 кг/ч.

Для разделения изотопов урана иногда применяются газовые центрифуги. Делительная мощность одной центрифуги — 0,08 г/ч, потребляемая мощность (электрическая) 700 вт. Для обеспечения полной деятельности мощности — 8 кг/ч нам потребуется 100 000 таких центрифуг. Потребляемая нашим заводом мощность на приведение в действие этих центрифуг будет равна 70 000 квт.

Если бы мы захотели получить 100 кг изотопа урана-235 в сутки, то нам понадобилась бы мощность 70 млн. квт. Отсюда ясно, как важно не ошибиться в расчетах разделительных установок: выбрав не лучший метод, можно весьма неэффективно использовать энергию на разделение.

Попробуем произвести изменения в нашем проекте. Допустим, что мы хотим спроектировать такой же завод, но количество изотопа урана-235 в отвальном продукте думаем уменьшить до 0,1%. В этом случае для получения того же количества урана, т. е. 1 кг/сут с содержанием 90%, нам будет нужно меньше сырья, которое стоит довольно дорого.

Приступая к первому этапу проектирования, отмечаем, что теперь из каждого килограмма сырья будет извлекаться 6,2 г. Для получения 900 г нужного изотопа

нам потребуется только 145 кг сырья вместо 250 кг определенного в предыдущем расчете.

Часовой выход готового продукта остается прежним — 0,042 кг/ч. Отвальный поток же изменится и будет равен 6 кг/ч. Величина потока питания теперь будет равна 6,04 кг/ч.

Полученная величина делительной мощности в этом случае равна 12,06 кг/ч, т. е. в полтора раза выше, чем в предыдущем случае. Однако величина делительной мощности каждой центрифуги остается неизменной. Это приводит к тому, что количество центрифуг возрастет до 150 000, а количество потребляемой энергии до 105 000 кВт. Выпуск же готового продукта остается неизменным: 1 кг концентрата с содержанием 90% изотопа урана-235.

Если мы увеличиваем извлечение, то возрастают потребности в делительной мощности, но уменьшаются затраты на сырье. Если мы уменьшаем извлечение, т. е. оставляем более богатый нужным компонентом отваль- ный поток, то мы сокращаем потребную делительную мощность, но увеличиваем расходы на исходное сырье (рис. 3).

Можно заметить, что если на предприятии делитель- ная мощность определена, то повысить извлечение металла из руды без технических усовершенствований невозможно. Попытка повысить извлечение металла из руды приведет к снижению количества выпускаемого продукта, что хорошо известно всем, кто имеет дело с процессами разделения. Оптимальный режим работы предприятия будет определен, как указывалось выше, потребностью страны в выпускаемом продукте. Если острого недостатка в нем нет, то предприятие будет ра- ботать так, чтобы полные затраты были минимальными.

Теперь нам следует разобрать еще один вариант

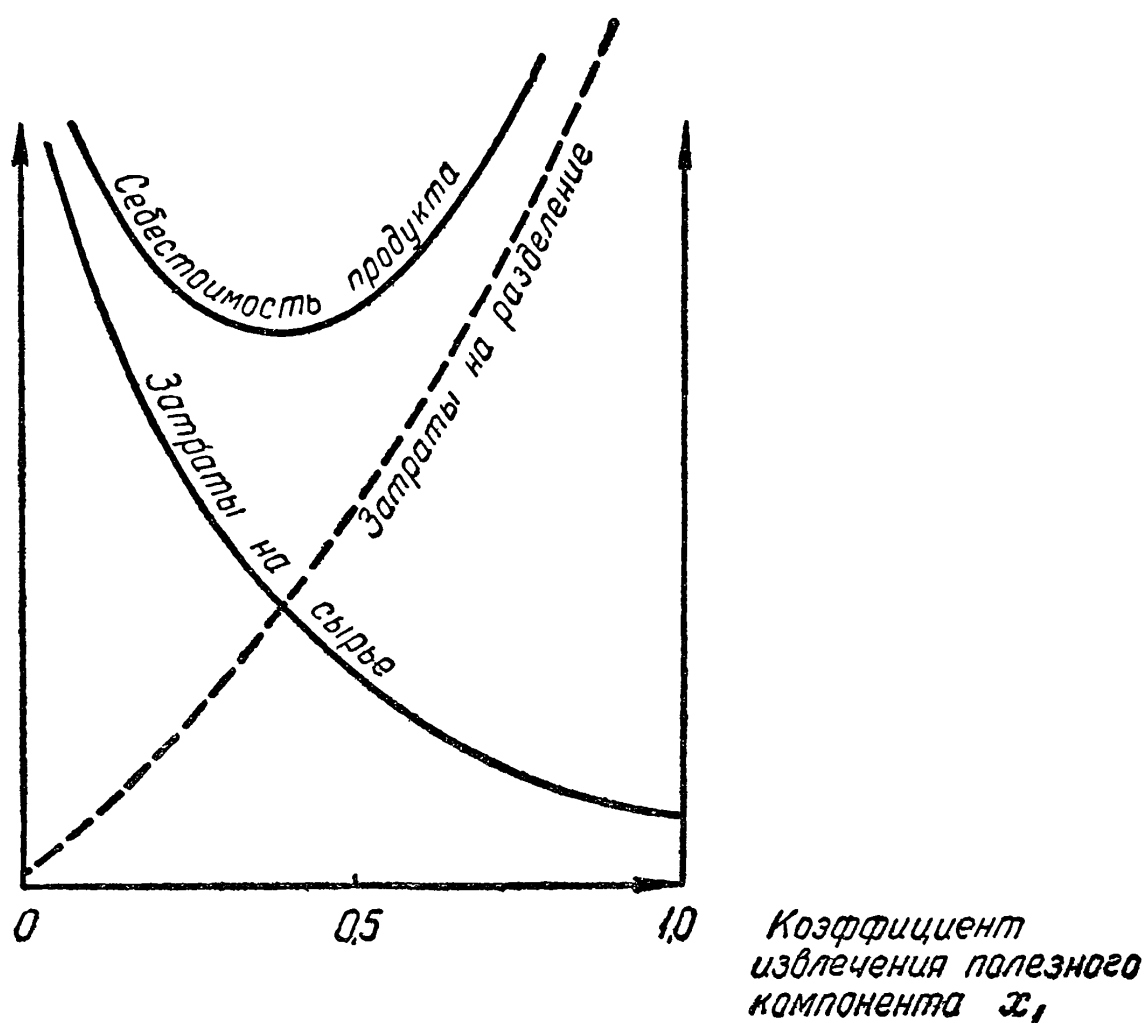


Рис. 3.

проектирования, когда содержание полезного компонента в исходной смеси оказалось меньше, чем в приведенных случаях. Допустим, что мы начали получать сырье с содержанием полезного изотопа не 0,72%, а только 0,60%. Для расчета сохраним степень извлечения неизменной, т. е. 0,5.

Опять определяем величины потоков. Так как из 1 кг смеси мы теперь извлекаем только 3 г, то потребное количество сырья возрастает до 300 кг/сут, что приводит к потоку питания 12,5 кг/ч. Поток готового продукта не-

изменен — 0,042 кг/ч, а отвальный поток практически равен потоку питания — 12,5 кг/ч.

Полученная делительная мощность оказалась равной 8,93 кг/ч, т. е. увеличилась на 11,6% относительно первого расчета. Это означает, что нам необходимо дополнительно поставить 11 600 центрифуг и увеличить расход энергии на 8120 кВт.

Незначительное ухудшение питания приводит к резкому возрастанию расходов на разделение. По этой причине и возникает множество недоразумений между поставщиками сырья и работниками разделительных установок.

Рассмотрим еще и обратный процесс: нам дали более богатое сырье — содержание полезного компонента в сырье возросло до 0,01, т. е. до 1%. Сохраним извлечение 0,5, это означает, что из 1 кг сырья мы извлекаем 5 г изотопа в продукт. Потребное количество сырья теперь будет равно 180 кг, т. е. поток сырья 7,5 кг/ч. Отвальный поток отличается на 42 г, т. е. 7,46 кг/ч.

Теперь мы обнаруживаем, что необходимая величина делительной мощности всего 5,4 кг/ч. Эту величину делительной мощности развивают всего 54 000 центрифуг, а потребная мощность для их работы — 37,8 тыс. кВт.

Мы уделили много внимания расчету различных вариантов завода для разделения изотопов и приходим к выводу, что хорошие и плохие результаты работы завода нельзя обнаружить простым рассмотрением цифр, характеризующих выпуск и качество продукта. Но умея определить величину делительной мощности завода, мы можем определить стоимость единицы делительной мощности, относя на полную величину делительной мощности завода все виды расходов без стоимости сырья.

Любое техническое усовершенствование, сделанное коллективом предприятия, снижает расходы на единицу

делительной мощности. Иногда делительная мощность зависит от режима работы. Нахождение минимума затрат на единицу делительной мощности возможно при непрерывной работе завода. Однако быстро производить вычисление этой величины — работа трудная. Теперь-то нам и понадобится вычислительная машина. После того как мы сами уяснили, что такое хорошая и что такое плохая работа предприятия, мы можем поручить управлять предприятием машине: «хорошо» и «плохо» для машины будут малые и большие расходы на единицу делительной мощности, т. е. результат определяется из сравнения чисел. Именно это и может делать управляющая машина. Проверьте это по «Таблице разделительного потенциала» (см. приложение).

ЭЛЕКТРОННЫЙ ДИСПЕТЧЕР

Как справедливо указано академиком А. И. Бергом, электронная вычислительная машина сможет управлять предприятием лишь при одном условии — при комплексной автоматизации всего технологического процесса. Действительно, для вычисления делительной мощности нам необходимы сведения о содержании полезного компонента во входящем и выходящем потоках. Представим себе, что лаборант отбирает пробу на анализ и несет ее в лабораторию. Через час или два в лаборатории получают анализ входящего и выходящего потоков, т. е. дают исходные данные для вычисления разделительных потенциалов. Машина очень быстро вычисляет делительную мощность, но... ту мощность, которая была два часа или час назад. Кому нужны сведения о погоде за вчерашний день?

Нам уже известно, что управляющая машина на предприятии, которое проводит операцию разделения, должна вычислять две величины: делительную мощность и затраты на разделение (собственно цену получаемых продуктов). Прежде чем машина приступит к расчету, она должна получить все необходимые ей для расчета сведения непосредственно от технологического процесса. Какова же природа получаемых машиной сведений для разделения смеси из двух компонентов?

Если известна величина потока, который поступает на разделение, и известно содержание полезного компонента в нем, то достаточно знать величину одного выходящего потока и содержание полезного компонента в этом же потоке. Величина второго потока и содержание полезного компонента во втором потоке могут быть вычислены самой машиной.

Для получения нужных сведений нам необходимо два прибора, которые измеряют величину потока, т. е. количество вещества, проходящего в единицу времени данное сечение аппарата, и два прибора, которые определяют концентрацию полезного компонента в этих потоках. Без достаточно быстрого и точного получения сведений об этих четырех величинах мы не можем использовать машину для управления. По этой причине с развитием вычислительной техники особенно остро встал вопрос об автоматическом контроле. Наибольшее число трудностей в автоматизации производства связано с быстрым и точным измерением состава продуктов в потоках. Выше мы видели, что общая теория разделения, которая рассматривалась нами в применении к разделению смесей, имеет отношение к разделению сигналов, т. е. к самим приборам, измеряющим состав. Так, например, газовые хроматографы, обладая большой делительной мощностью, но используемые на малые количества

газов, выполняют разделение смеси быстрее, чем основной аппарат. Это все равно, что использовать большую мощность подъемника на подъем очень маленького груза — мы получаем выигрыш в скорости. Связь быстрого действия аппаратуры контроля и регулирования с потребляемой мощностью уже давно известна из работ академика В. С. Кулебакина и положена в основу расчета систем автоматического регулирования А. Я. Лернером.

Допустим, что на нашем предприятии названные четыре прибора уже стоят и выдают нужные нам сведения. Теперь мы можем поручить машине произвести вычисления величины второго выходящего потока и концентрацию полезного компонента в нем. Программа этих вычислений, или, пользуясь термином кибернетики и математики, алгоритм, нам уже известна. Если от полной величины исходного потока отнять величину первого выходящего потока, то полученный результат и есть величина второго потока. Вычисляем количество вещества, которое выходит во втором потоке.

Все необходимые математические действия могут быть записаны символически. Такая запись представляет собой часть программы для нашей электронной управляемой машины.

Этой части недостаточно для вычисления величины делительной мощности. Однако мы уже можем определить все необходимые для вычисления делительной мощности шесть чисел. Будем называть эту часть программы подпрограммой. Полученные шесть чисел еще не программа для определения делительной мощности — нам нужно иметь программу, по которой машина переходит от концентрации компонента в смеси к значению разделительного потенциала, соответствующего этой концентрации. Пользуясь такой программой, машина будет

находить значение разделительного потенциала для каждой концентрации полезного компонента. Назовем эту подпрограмму второй подпрограммой.

После того как машина найдет значение разделительного потенциала для каждого выходящего потока, мы можем поручить ей третью часть работы: вычислить делительную мощность нашего предприятия в данном режиме работы.

Последовательность всех трех подпрограмм и составляет программу определения делительной мощности предприятия. Однако сама по себе делительная мощность ничего не говорит об экономичности работы предприятия. Нам необходимо получить величину затрат на единицу делительной мощности. Для этого нам необходимо получить сведения о затратах.

Все затраты предприятия можно разделить на две части: постоянные затраты (на амортизацию и пр.) и текущие затраты. Мы уже указывали, что затраты на сырье нам необходимо учитывать отдельно. Текущими затратами будет расход реактивов, энергии пара, воды, электроэнергии. В самом технологическом процессе нельзя увидеть этих затрат — они принимают весьма замысловатый вид. Допустим, что у нас работает дистилляционная колонна. Давление, которое мы имеем в колонне, создается компрессором. Если давление 1,6 атм, то компрессор потребляет одно количество энергии, а если давление 2 атм, то на поддержание большей величины давления компрессор потребляет большее количество энергии. Ни показатель давления, ни показатель температуры в колонне, как бы точно мы их ни измеряли, ничего не могут сказать о количестве энергии, которую потребляет компрессор. Но зато расходомер теплоты эту величину показывает довольно хорошо. Расход электроэнергии и теплоты, потребляемых предприя-

тием, всегда выражен в деньгах. Если учитывать все входящие потоки, то можно определить текущие расходы. Программа этих вычислений практически подобна программе для вычисления делительной мощности и может быть выражена следующими словами: измеряй все входящие потоки, умножай величину каждого потока на его стоимость и сложи полученные произведения. Прибавь к результату постоянные расходы.

Все сказанное о вычислении расходов машиной доступно каждому читателю, однако, когда ставится вопрос об автоматическом измерении всех названных величин, да еще в очень короткие сроки (не будет же машина вести расчеты о вчерашнем дне!), мы снова сталкиваемся с проблемой измерения. Допустим, что и эта проблема полностью разрешена на нашем предприятии: мы умеем вычислять делительную мощность на каждую минуту работы предприятия. Вот с этого момента и начинается настоящая химическая кибернетика. Есть ли у нас уверенность, что тот режим работы, который осуществляется в данный момент, является наилучшим? Такой уверенности у нас нет. Можно ли улучшить работу предприятия? Скорее всего да. Как же достичь этого результата?

В любом производстве конечный результат разделения зависит от большого числа меняющихся величин, которые мы будем называть параметрами процесса. В качестве параметров в дистилляционной колонне мы можем принять распределение температур по высоте колонны, распределение давлений, высоту ввода или расстояние от основания колонны до места ввода исходного сырья, величину потока питания, величину первого и второго выходящих потоков и много других величин.

Изменение каждой из измеряемых величин некоторым сложным образом оказывает воздействие на все остальные величины, характеризующие технологический

процесс. Таких измеряемых величин, каждая из которых оказывает свое воздействие на все остальные величины, можно насчитать до 30—50 в каждом устройстве. Тут не только читатель, но и специалист смотрит на 30—50 чисел и думает: «Хорошие это числа или плохие? Может быть какая-то комбинация этих чисел была бы лучше?» Названный пример можно было бы считать шуткой, если бы инженер не испытывал грусти, взирая на десятки приборов, которые установлены на реальный аппарат.

Между тем, методы кибернетики, достаточно хорошо развитые в применении к более сложным случаям, показывают, что решить эту задачу без машины практически невозможно. Нам опять нужно выяснить, что и как мы делали бы без машины и как эту работу можно поручить машине. Вернемся к нашему подъемнику. Что можно сделать с подъемником, чтобы его полезная мощность увеличилась?

В подъемнике есть всего две возможности:

1. Увеличить величину потребляемой мощности при сохранении полезной доли неизменной.
2. Уменьшить величину потерь при неизменной потребляемой мощности.

Не исключена и комбинация этих возможностей, которую мы можем разложить на части — на увеличение полной мощности, на повышение коэффициента полезного действия.

Может ли инженер, рассматривающий свой сверхсложный аппарат, сделать что-либо, что отличается от усовершенствования подъемного механизма? Оказывается, нет. Сама смесь не может превратиться в чистые вещества, так как при смешении выделяется энергия. Следовательно, он может получить свой результат, лишь расходуя энергию. С этого момента мы обнаруживаем,

что его задача практически совпадает с задачей улучшения подъемника, т. е. он может либо увеличить полный расход энергии на разделение, либо уменьшить величину бесполезных потерь.

Последуем совету Козьмы Пруткова: «Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустою забавою».

Будем воздействовать некоторым образом на наши параметры и наблюдать за изменением делительной мощности. Зафиксируем полный расход энергии, т. е. величину полной мощности, потребляемой нашей установкой. После такой фиксации уменьшим подачу исходной смеси. Не исключено, что при меньшей скорости подачи исходной смеси и меньшей величине отбора полная величина делительной мощности изменится — она может уменьшиться, но может и увеличиться. Закончив эксперимент с изменением величины подачи исходной смеси, мы придем к заключению, что если все остальные 49 параметров сохраняют заданное значение и изменяется скорость подачи смеси на разделение, то делительная мощность увеличивается (или убывает) на столько-то килограммов в час при изменении потока на 1 кг/ч. Такой эксперимент можно провести по изменению всех остальных 49 параметров, изменяя значение каждого параметра и фиксируя при этом значение остальных. Первый круг в 50 экспериментов мы сделаем, а наши знания относительно наилучшего режима практически не изменились. Придется приступить ко второму кругу наблюдений.

Изменим значение скорости подачи так, что величина делительной мощности несколько увеличится. Теперь будем изменять все остальные параметры, сохраняя скорость подачи неизменной. Проведем еще 49 экспериментов и снова установим влияние каждого изменения

на величину делительной мощности. Однако не совсем ясно, почему мы решили искать оптимальный режим при новом значении мощности. Может быть, лучше искать оптимальный режим при более высокой температуре в кубе колонны? Сделаем и такую серию экспериментов. Установим новую температуру в кубе колонны и опять сделаем 49 экспериментов с изменением остальных параметров.

Нетрудно показать, что число нужных экспериментов равно примерно 10^{15} . Значительность получаемого числа можно представить себе следующим образом. Представим себе, что каждый эксперимент продолжается 1 сек. Для выполнения всех намеченных экспериментов нам понадобится 300 млн. лет. После окончания этой серии экспериментов мы обнаружим, что до наилучшего режима разделения еще очень далеко.

Тем не менее, задача вполне разрешима, как показывают работы В. В. Налимова и его сотрудников. Указанные выше методы решения задач химической технологии и металлургической промышленности получили у нас несколько названий, хотя и сохраняют все признаки так называемого «факторного эксперимента». Для приведенного выше примера с большим числом переменных, которые мы пытались последовательно изучать на двух уровнях, мы уже получили оценку числа необходимых экспериментов.

При правильном планировании эксперимента удастся находить оптимальный режим работы сложного аппарата со значительно меньшим числом испытаний. Будучи правильно выбранными, эти серии, называемые блоками или репликами, позволяют извлечь необходимые данные по вкладу каждого из исследуемых параметров в искомую величину полезной мощности.

Так определяют основные эффекты и взаимодействия,

т. е. роль каждого фактора в величине делительной мощности и роль их совместного действия. Благодаря тому, что выясняется роль каждого фактора, мы можем изменять параметры работы установки таким образом, что делительная мощность установки от эксперимента к эксперименту будет возрастать. Это движение в сторону возрастания величины делительной мощности соответствует «крутому восхождению» на гору, что можно иллюстрировать примером из обыденной жизни. Представим себе, что человек находится перед возвышенностью и пытается кратчайшим путем добраться до вершины. Для этого он должен двигаться по наиболее крутой части вершины. Нечто подобное осуществляется в приведенном математическом примере по отношению к вершине — максимальной величине полезной делительной мощности. В подъемнике можно устранять множество недоделок, чтобы улучшить его работу: смазать трущиеся части в разных местах, облегчить вес пустой кабины подъемника и т. п. В многофакторном эксперименте мы как бы устраняем сразу множество различных неполадок, которые нельзя было учесть при проектировании установки.

Теперь мы имеем возможность познакомиться с серийными вычислительными машинами, выпускаемыми нашей промышленностью для управления предприятиями химической и металлургической промышленности.

Все выпускаемые машины можно разделить на три класса в зависимости от назначения:

1. Диспетчер-информатор.
2. «Советчик».
3. Управляющая машина.

Работа машины в качестве диспетчера, или информационной машины, — это еще не управление. Практически это единая измерительная схема, предназначенная для

измерения некоторой электрической величины во многих точках. Измеряемые электрические величины (например, напряжения на концах термопар) связаны некоторой зависимостью с величиной измеряемой температуры. Однако измерение температур или давлений, которое осуществлялось многими приборами, совмещается с самой информационной машиной. Такая машина напоминает большой измерительный прибор, измеряющий названные величины в ста, двухстах или трехстах местах. Результаты измерения наблюдаемых величин автоматически печатаются цифровой машинкой. При совпадении наблюдаемой величины с заданным значением, результат печатается черным шрифтом, а при отклонении — красным. В некоторых случаях наличие существенных отклонений от заданного режима сопровождается соответствующей сигнализацией.

Такая система, автоматически измеряющая показания многих приборов, представляет собой только часть настоящей управляющей машины, да и то только в том случае, если установлены необходимые приборы: без автоматических анализаторов качества такая машина практически почти ничего не дает. К числу машин такого класса относятся машины «Марс».

Мы видим, что для управления производством машина должна быть хотя бы быстродействующим учетчиком расходов, которые несет предприятие. Это означает, что, измеряя приборами расходные потоки, машина должна вычислять затраты по каждому виду потока: если это электроэнергия, то она должна учитывать расход энергии за единицу времени и перемножать на стоимость электроэнергии. Полученное число — расход электроэнергии в рублях за час, полезно поместить на световой указатель диспетчеру. Заметное отклонение этого числа от нормы указывает диспетчеру на отклонение от режи-

ма. Другое число, имеющее ту же размерность, может характеризовать потребление пара, третье число — расход реактива. Сумма всех чисел в рублях характеризует затраты, которые несет предприятие в час при данном режиме работы.

Машины, которые выполняют названные операции, известны как серия ЭРЛУ — электронное регистрирующее и логическое устройство. Само собой разумеется, что на предприятии, выполняющем операцию разделения, такой машине можно было бы поручить автоматическое вычисление делительной мощности. Однако в названной системе централизованного контроля и регистрации производственных параметров, хотя и существуют элементы для некоторых вычислений, такого блока пока нет. Существующие преобразователи позволяют находить средние величины расходов по измеренной величине потока и перемножать расход на цену единицы и далее суммировать расходы по всем расходным показателям. Но они не приспособлены к выполнению второй подпрограммы, т. е. к вычислению делительной мощности. Названные обстоятельства и потребовали создания более совершенной вычислительной машины для управления производственными процессами.

Такая управляющая машина широкого назначения — УМШН — в настоящее время запущена в серийное производство. Эта вычислительная машина предназначена для управления объектами химической, металлургической, нефтеперерабатывающей промышленности. Она может использоваться практически на любом предприятии, которое обеспечено средствами автоматического контроля всех необходимых параметров.

Последнее указание — о всех автоматически контролируемых параметрах — означает, что там, где проба на анализ отдается в лабораторию, использовать машину

практически невозможно. Последнее не очень приятно для химиков и физико-химиков, отдавших много сил разработке аналитических средств контроля технологических процессов в аналитических лабораториях. Эти методики анализа могут быть использованы в качестве основы для создания автоматических анализаторов состава. С другой стороны, химики и физико-химики аналитики должны уже сегодня обратить внимание не на разработку аналитических средств для лабораторных условий, а принимать непосредственное участие в работе специалистов по системам автоматического регулирования, по созданию автоматических быстродействующих анализаторов химического состава. Это же обстоятельство следует иметь в виду технологам. Приступая к проектированию производственного технологического процесса, необходимо принять во внимание возможность использования для управления процессом управляющей электронной машины. Это означает, что в проектируемом процессе должны быть определены все контролируемые и регулируемые величины. Учтена возможность контролировать эти величины, ибо часто бывает, что незначительное изменение технологии, допустимое в стадии проектирования, весьма облегчает контроль процесса. Короче говоря, теперь требования к технологии определяются не просто требованием выдать продукт нужного качества, но и пригодностью процесса для автоматического управления. Невыполнение этих требований технологами приводит, образно говоря, к установке атомного двигателя на телегу. Специалисты по вычислительной технике вынуждены обвешивать схему множеством приборов, но и это не всегда приводит к нужным результатам: некоторые технологические процессы оказываются неустойчивыми, т. е. резко уклоняются от лучшего режима при малейших отклонениях параметров. Этот раздел

проектирования технологических процессов с учетом устойчивости технологического процесса только возникает под влиянием требований, выдвигаемых использованием вычислительных машин.

Все изложенное выше показывает, что на пути к использованию управляющей машины широкого назначения стоят не ограниченные возможности вычислительных машин, а ограниченность некоторых специалистов, не желающих считаться с новыми требованиями, предъявляемыми к проектированию современных технологических процессов. Комплексное проектирование новых технологических процессов возвращает нас к началу нашей брошюры, к важнейшей идее кибернетики — к бригадному методу работы над проектом. Если в начале брошюры мы говорили об этом в смысле «хорошо бы так», то теперь мы можем говорить об этом — «необходимо так и только так». По этой причине не приходится удивляться, что среди кибернетиков представлены практически специалисты всех отраслей науки.

Уже созданные коллективы кибернетиков, осваивающие бригадный метод работы, представляют собой принципиально новое явление в науке — эти коллективы несут в себе элементы науки будущего.

Вернемся к нашей управляющей машине широкого назначения. Что в ней должно быть?

Прежде всего — устройство для связи с приборами автоматического контроля. Можно не сомневаться, такое устройство в ней действительно есть. Более того, все показания приборов могут быть приведены к величине расхода, который несет предприятие в час в рублях. Во второй части программы мы рассматривали (для разделительных установок) вычисление полезной мощности через показания аналитических приборов. Эта программа может быть легко реализована цифровой вычис-

лительной машиной. Теперь остается сравнить два полученных числа, т. е. определить величину затрат на единицу делительной мощности. Эта часть программы также реализуется универсальной вычислительной машиной широкого назначения.

Представим себе, что в силу случайного изменения условий изменилось давление пара в колонне. При новом зарегистрированном давлении пара вычисленная величина делительной мощности возросла, а расходы увеличились в меньшей степени. Вычисление затрат на единицу делительной мощности показывает, что данный режим разделения более эффективен.

Автоматический поиск наилучшего режима с помощью вычислительной машины за счет такого «блуждания» параметров процесса осуществляется следующим образом. В памяти машины содержатся сведения о необходимых показаниях различных приборов, которые машина поддерживает с помощью многочисленных регуляторов. Этот набор показаний хранится в памяти машины до тех пор, пока не появится такой набор показаний приборов, который обеспечивает лучшие экономические показатели работы разделения. С этого момента машина «забывает» старые данные и «запоминает» новые, лучшие по экономическим показателям. Вот такие системы и получили название самообучающихся. Если мы понимаем, как отличать хороший режим работы от плохого, то это и обеспечивает самообучение машины.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица разделительного потенциала

$$\Phi(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1-x}$$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,0000009	13,87	0,00021	8,47	0,00051	7,58
0,0000018	13,18	0,00022	8,43	0,00052	7,56
0,0000028	12,77	0,00023	8,38	0,00053	7,54
0,0000038	12,48	0,00024	8,34	0,00054	7,52
0,0000047	12,26	0,00025	8,30	0,00055	7,50
0,0000057	12,08	0,00026	8,26	0,00056	7,49
0,0000067	11,92	0,00027	8,22	0,00057	7,47
0,0000076	11,79	0,00028	8,18	0,00058	7,45
0,0000086	11,67	0,00029	8,15	0,00059	7,43
0,0000095	11,56	0,00030	8,12	0,00060	7,42
0,000010	11,51	0,00031	8,08	0,00062	7,38
0,000020	10,82	0,00032	8,05	0,00064	7,35
0,000030	10,42	0,00033	8,02	0,00066	7,32
0,000040	10,13	0,00034	7,99	0,00068	7,29
0,000050	9,91	0,00035	7,96	0,00070	7,26
0,000060	9,73	0,00036	7,93	0,00072	7,23
0,000070	9,57	0,00037	7,90	0,00074	7,20
0,000080	9,44	0,00038	7,87	0,00076	7,18
0,000090	9,32	0,00039	7,85	0,00078	7,15
0,000100	9,22	0,00040	7,82	0,00080	7,13
0,00011	9,12	0,00041	7,80	0,00082	7,10
0,00012	9,03	0,00042	7,77	0,00084	7,08
0,00013	8,95	0,00043	7,75	0,00086	7,05
0,00014	8,88	0,00044	7,73	0,00088	7,03
0,00015	8,81	0,00045	7,71	0,00090	7,00
0,00016	8,75	0,00046	7,68	0,00092	6,98
0,00017	8,68	0,00047	7,66	0,00094	6,96
0,00018	8,63	0,00048	7,64	0,00096	6,94
0,00019	8,57	0,00049	7,62	0,00098	6,91
0,00020	8,52	0,00050	7,60	0,0010	6,89

Продолжение

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,0011	6,80	0,0047	5,31	0,013	4,22
0,0012	6,71	0,0048	5,28	0,014	4,14
0,0013	6,63	0,0049	5,26	0,015	4,06
0,0014	6,55	0,0050	5,24	0,016	3,99
0,0015	6,48	0,0051	5,22	0,017	3,92
0,0016	6,42	0,0052	5,20	0,018	3,86
0,0017	6,35	0,0053	5,18	0,019	3,79
0,0018	6,30	0,0054	5,16	0,020	3,74
0,0019	6,24	0,0055	5,14	0,021	3,68
0,0020	6,19	0,0056	5,12	0,022	3,63
0,0021	6,14	0,0057	5,10	0,023	3,58
0,0022	6,09	0,0058	5,08	0,024	3,53
0,0023	6,05	0,0059	5,07	0,025	3,48
0,0024	6,00	0,0060	5,05	0,026	3,44
0,0025	5,96	0,0062	5,01	0,027	3,39
0,0026	5,92	0,0064	4,98	0,028	3,35
0,0027	5,88	0,0066	4,95	0,029	3,31
0,0028	5,84	0,0068	4,92	0,030	3,27
0,0029	5,81	0,0070	4,89	0,031	3,23
0,0030	5,77	0,0072	4,86	0,032	3,19
0,0031	5,74	0,0074	4,83	0,033	3,16
0,0032	5,71	0,0076	4,80	0,034	3,12
0,0033	5,67	0,0078	4,77	0,035	3,09
0,0034	5,64	0,0080	4,74	0,036	3,05
0,0035	5,61	0,0082	4,72	0,037	3,02
0,0036	5,58	0,0084	4,69	0,038	2,99
0,0037	5,55	0,0086	4,67	0,039	2,95
0,0038	5,53	0,0088	4,64	0,040	2,92
0,0039	5,50	0,0090	4,62	0,041	2,89
0,0040	5,47	0,0092	4,59	0,042	2,87
0,0041	5,45	0,0094	4,57	0,043	2,84
0,0042	5,42	0,0096	4,55	0,044	2,81
0,0043	5,40	0,0098	4,53	0,045	2,78
0,0044	5,37	0,010	4,50	0,046	2,75
0,0045	5,35	0,011	4,40	0,047	2,73
0,0046	5,33	0,012	4,31	0,048	2,70

Продолжение

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,049	2,68	0,086	1,96	0,27	0,46
0,050	2,65	0,088	1,93	0,28	0,42
0,051	2,63	0,090	1,90	0,29	0,38
0,052	2,60	0,092	1,87	0,30	0,34
0,053	2,58	0,094	1,84	0,31	0,30
0,054	2,55	0,096	1,81	0,32	0,27
0,055	2,53	0,098	1,79	0,33	0,24
0,056	2,51	0,10	1,76	0,34	0,21
0,057	2,49	0,11	1,63	0,35	0,19
0,058	2,46	0,12	1,51	0,36	0,16
0,059	2,44	0,13	1,41	0,37	0,14
0,060	2,42	0,14	1,31	0,38	0,12
0,062	2,38	0,15	1,21	0,39	0,10
0,064	2,34	0,16	1,13	0,40	0,08
0,066	2,30	0,17	1,05	0,41	0,07
0,068	2,26	0,18	0,97	0,42	0,052
0,070	2,23	0,19	0,90	0,43	0,039
0,072	2,19	0,20	0,83	0,44	0,029
0,074	2,15	0,21	0,77	0,45	0,020
0,076	2,12	0,22	0,71	0,46	0,013
0,078	2,09	0,23	0,65	0,47	0,007
0,080	2,05	0,24	0,60	0,48	0,002
0,082	2,02	0,25	0,55	0,49	0,001
0,084	1,99	0,26	0,50	0,50	0,000

ОГЛАВЛЕНИЕ

«Коллективный мозг»	3
Проблема 1	6
Три проблемы атомной энергии	12
Кибернетика... и кофе	27
Что такое хорошо и что такое плохо?	32
Что делать и как делать?	38
Электронный диспетчер	50
<i>Приложение</i>	64

*Побиск Георгиевич Кузнецов,
Герман Владимирович Смирнов*

КИБЕРНЕТИКА И ХИМИЯ

Редактор *Г. С. Метельская*
Художник *В. П. Андреев*
Художественный редактор *Л. И. Наумов*
Технические редакторы *В. Ф. Коскина,
В. В. Новоселова*
Корректор *Г. К. Храпова*

Сдано в набор 16/XI 1965 г. Подписано к печати 28/IV 1966 г. 70 × 108¹/₃₂. Печ. л. 2,125 (1,49).
Уч.-изд. л. 2,76. Тираж 25 тыс. экз. (Пл. 1966 г. № 184). А 13411. Зак. 5700. Цена 10 коп.

Издательство «Просвещение» Комитета по печати при Совете Министров РСФСР. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Типография издательства «Горьковская правда», г. Горький, ул. Фигнер, 32.

10 коп.

