

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КАБИНЕТ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Киев УМК ВО 1992

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КАБИНЕТ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ДНІПРОПЕТРОВСКИЙ МЕТАЛЛУРГІЧЕСКИЙ ІНСТИТУТ

ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТА

Под редакцією В.І. Баптизманського, Ю.Н. Яковлєва

Угвердено Советом Учебно-методического кабинета
высшего образования при Минвузе Украины в ка-
честве учебного пособия для студентов специальнос-
тей II.01 "Металлургия черных металлов" и II.04
"Физико-химические исследования металлургических
процессов"

Киев УМК ВО 1992

УДК 669.1:001 /07/

Организация эксперимента: Учеб.пособие / В.И.Балтизманский,
Ю.Н.Яковлев, Ю.С.Паниотов и др. Под ред. В.И.Балтизманского,
Ю.Н.Яковлева. - К.: УМК ВО, 1992. - 244 с.

В учебном пособии освещены роль и значение эксперимента в ускорении научно-технического прогресса, основы методологии и организации научно-исследовательских работ /НИР/. Излагаются вопросы планирования эксперимента, математического обеспечения научных исследований, физического и математического моделирования металлургических процессов, использования и применения ЭВМ при проведении и обработке результатов экспериментов.

Описаны методы исследований основных металлургических процессов: подготовки рудного сырья, доменного, ферросплавного и сталеплавильного производства, разливки стали и качества металла. Рассмотрены вопросы оформления и внедрения результатов НИР в промышленность.

Может быть использовано преподавателями вузов, научными и инженерно-техническими работниками институтов и заводских лабораторий.

Табл. 49 Ил. 33. Библиогр.: 27 назв.

Рецензенты: Н.П.Котевов, М.И.Гасик

ISBN 5-7763-0075-5

(С)

Учебно-методический кабинет
высшего образования, 1992

Учебное издание

Балтизманский Вадим Ипполитович
Яковлев Юрий Николаевич
Паниотов Юрий Семенович
Ковшов Владимир Николаевич
Игнатьев Владимир Сергеевич

Организация эксперимента

Учебное пособие

Редактор В.Г.Шевелева

Корректоры: А.С.Минеева

Т.А.Ярошенко

Г.С.Чуб

Темплан 1992, поз. 170

Подп. к печ. 11.12.91. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага
тип. № 3. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,25. Усл. кр.-отт. 4436.
Уч.-изд. л. 15,94. Тираж 500.
Зак. № 2497. Цена 60 к.

УМК ВО при Минвузе Украины
252135, г. Киев, проспект Победы, 10.

РАПО «Укрвузполиграф».
252151, г. Киев, ул. Волынская, 60.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшую роль в поднятии на качественно новую ступень производительных сил и производственных отношений, кардинальном ускорении научно-технического прогресса /НТП/, обеспечения быстрого продвижения экономики на стратегических направлениях ее развития, создании модернизированного производственного потенциала должны сыграть наука, эксперимент как неотъемлемая ее часть, их организация.

Крупнейшие открытия фундаментальных наук конца XIX – начала XX века в области атомной и ядерной физики, электроники, кибернетики, биологии привели к значительному росту производительности труда, созданию принципиально новых технологий производства. Это положило начало эпохе научно-технической революции /НТР/, которая обусловила коренное качественное преобразование производительных сил. В ходе НТР, начало которой относится к середине 40-х годов XX века, бурно развивается и завершается процесс превращения науки в непосредственную производительную силу общества.

Развитие науки приводит к коренным изменениям в технике и технологии. Технология производства, в частности металлургического, основываясь на достижениях науки, все в большей степени строится на принципах кардинального повышения качества продукции, безотходности /ма-лоотходности/ минимального загрязнения окружающей среды, интенсификации на основе погочности и непрерывности процессов.

При решении ответственных задач, стоящих перед наукой, необходимо концентрировать силы, внимание ученых, ресурсы на наиболее важных и перспективных направлениях НТП.

В области производства материалов важно увеличивать выпуск высококачественных сталей, аморфных и сверхчистых металлов, прогрессивных и упрочненных видов проката, композиционных материалов, материалов с заранее заданными свойствами.

В периоды, предшествующие бурному развитию НТР, центральной фи-
гурой, определяющей многие положения технологии металлургического про-
изводства, был мастер. Развитие металлургии и смежных отраслей науки
значительно углубило наши знания сущности, закономерностей основных
металлургических процессов, привело к созданию современных методов
регулирования, исследования их хода, качества сырых материалов и про-
дуктов плавки. В этих условиях главными фигурами НТИ стали научный
сотрудник /исследователь/, инженер-производственник, часто проекти-
ровщик, вооруженные глубокими знаниями теории и практики, оснащенные
арсеналом средств современной исследовательской аппаратуры. В тесном
творческом союзе они определяют рациональные технологии процесса и
конструкцию агрегатов, создают новые.

Для постоянного обновления и совершенствования технологии плавки,
конструкций машин и агрегатов, выпускаемой продукции необходимо прово-
дить научные поиски, эксперименты. В настоящее время ни один техноло-
гический процесс не изменяется без детального изучения его влияния на
качество продукции и технико-экономические показатели производства.
Любая новая технология не может быть внедрена в производство без тща-
тельной ее проверки, отработки в лабораториях, на опытных и полупро-
мышленных установках.

х x
 x

Перед вузами поставлена ответственная задача - обеспечить подго-
товку специалистов широкого профиля, нового качества - творческого ги-
па, гарантирующую выход страны на передовые рубежи научно-технического
и социального прогресса. Необходимо воспитывать кадры, способные обес-
печить революционные преобразования в технике, технологии, организации
производства на рубеже XX и XXI веков. Намечено осуществить решительный
переход от массового, валового обучения к его индивидуализации, разви-
тию творческих способностей и мышления будущих специалистов, опираясь
на их самостоятельную работу, активные методы обучения, компьютери-
зацию.

Одним из основных способов развития аналитического и творческого
мышления является обязательное участие студентов в научных исследова-
ниях кафедр, реальных разработках. Во многих вузах страны научно-ис-
следовательская работа студентов /НИРС/ стала неотъемлемым элементом
учебного процесса. Включение ее в учебный план способствует закрепле-
нию теоретических знаний, особенно специальных, выработке высокой тре-

зопательности к себе, научной объективности, приобретению в стенах вуза навыков исследователя, экспериментатора. Наибольший эффект получается тогда, когда идеи исследований и экспериментов взаимосвязаны с содержанием курсового и дипломного проектирования.

Самые глубокие знания по организации, планированию и методике исследований студенты получают при выполнении ими учебной /курсовой/ научно-исследовательской работы /НИР/. Подготовка к ней начинается с изучения курса "Организация эксперимента". Задачи курса - ознакомить студентов с методологическими основами научного познания, а также с организацией, целями и видами исследований, научить их составлять программу и план экспериментов; дать представление о математическом планировании эксперимента, статистических и специальных математических методах обработки данных, применении ЭВМ, составлении физических и математических моделей различных процессов; ознакомить с научной аппаратурой и методами проведения исследований, экспериментов по специальности; изложить основные требования к составлению и оформлению отчета о законченной НИР.

В пособии обобщен и систематизирован современный опыт организации, проведения научных исследований и экспериментов по подготовке сырья к плавке в доменном, ферросплавном, сталеплавильном и электросталеплавильном производствах.

Рассмотрены как общая методика проведения НИР, так и некоторые наиболее часто применяемые частные методы исследований. Прикладные научные исследования разделены на теоретические, лабораторные, полу-промышленные и промышленные.

Анализ научной информации представлен как отдельный вид НИР. Наиболее полные и значимые результаты исследований, экспериментов могут быть получены при оптимальном сочетании всех их видов.

При написании учебного пособия использован опыт преподавания курсов "Организация эксперимента" и "Основы научных исследований", накопленный на кафедрах металлургии чугуна, металлургии стали, электрометаллургии и теории металлургических процессов Днепропетровского металлургического института.

Введение и § I гл.9 написаны В.И.Баптизманским; гл.I-3, § I-4 гл.7, § 2, З гл.10 - Ю.Н.Яковлевым; гл.4, § I-5, гл.5, § 5-7, гл.7, § 2, гл.9 и 12 - Ю.С.Паниковым; гл.6, § I-3, гл.8, II - В.Н.Ковшовым; § 6-8 гл.5, § 4 гл.8., § 3, 4 гл.9 и § I гл.10 - В.С.Игнатьевым.

Глава I. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ И ТВОРЧЕСТВА

§ I. Методология научного исследования

Диалектико-материалистическая теория познания вскрыла природу знания, обосновав ее посредством принципа отражения. Знание представляет собой адекватное отражение действительности в сознании человека, проверенное общественно-исторической практикой и удостоверенное логикой. Знание не дано изначально, а приобретается человеком в ходе жизни в обществе и является результатом познания – процесса обогащения новым знанием. Исследователь стремится к познанию мира /предметов, явлений, закономерностей их развития, взаимосвязей между ними, причин и следствий таких связей/ для получения объективных сведений о действительности и пользуется при этом научным методом.

Метод – совокупность приемов и операций практического и теоретического освоения действительности. Основное содержание методов науки составляют прежде всего научные теории, проверенные практикой. Развитие и дифференциация методов познания привели к учению о методах – методологии. Наряду с этим методологией называют и саму систему принципов и способов организации и построения теоретической и практической деятельности.

Метод познания действительности лишь тогда является практическим успешным, когда он научен, т.е. отражает объективные законы самой действительности. Метод и теория находятся между собой в неразрывном единстве и переходят друг в друга. Будучи результатом познания, метод становится предпосылкой дальнейшего исследования.

Познание осуществляется как переход от незнания к знанию, от одного знания к другому, более глубокому, как движение к объективной, все более многогранной истине. Процесс этот складывается из множества моментов, сторон, необходимо связанных друг с другом. В научном познании существуют два уровня, отличающихся по способу достижения основного содержания знания и по форме выражения, – эмпирический и теоретический /соответственно называют и уровни знания/.

Эмпирическое знание характеризует непосредственно объект и выводится в основном из опыта /наслаждений, экспериментов/ путем некоторой рациональной обработки. Примером могут служить численные результаты эксперимента, обработанные методами математической статистики и представленные в виде математических выражений, так называемых эмпирических уравнений или формул.

Теоретическое знание всесторонне характеризует объективную реальность в ее существенных связях и закономерностях и связано с совершенствованием и развитием понятийного аппарата науки. Оно может быть получено и в относительной независимости от опыта, например, посредством введения гипотетических допущений или теоретических моделей. Так, И.Фурье вывел дифференциальное уравнение теплопроводности, приняв гипотезу о пропорциональности теплового потока градиенту температур.

Эмпирический и теоретический уровни познания тесно связаны между собой, так как теоретические построения возникают на основе обобщения имеющихся знаний, в том числе и полученных из наблюдений, экспериментов, и, в свою очередь, ориентируют и направляют эмпирическое исследование. Развитие познания предполагает непрерывное взаимодействие опыта и теории. Конечная цель научного познания – теория. Степень развития науки определяется не столько количеством добытых эмпирических знаний, сколько полнотой и достоверностью выдвинутых и достаточно обоснованных теорий.

Уровень знаний определяется не только тем, каким способом получено знание – опытным путем или в процессе теоретического мышления, но и тем, как в нем отражен объект исследования – во всех своих связях или с одной, хотя и очень важной стороны. С этой точки зрения принято разделять знание на конкретное и абстрактное.

Абстракция – формирование образов реальности /представлений, понятий, суждений/ посредством отвлечения и пополнения, т.е. использования /или усвоения/ лишь части из множества соответствующих данных и прибавления к этой части новой информации, не вытекающей из указанных данных. Посредством абстракции предмет мысленно анализируется, разлагается на абстрактные определения. Образование последних есть средство достижения нового, конкретного знания. Это движение мысли называется восхождением от абстрактного к конкретному. Движение от чувственно-конкретного через абстрактное к конкретному в мышлении является законом развития теоретического познания.

§ 2. Методы научного познания

Развитие и совершенствование методов познания неразрывно связано с развитием науки. Значительный вклад в теорию познания внесли Евклид, Бэкон, Галилей, Декарт, Кант, Ломоносов, Энгельс и др.

Основными орудиями исследователя в эмпирическом познании мира, в сборе фактов независимо от области его интересов являются наблюдения и эксперименты.

Наблюдение – это преднамеренное и целенаправленное восприятие, обусловленное задачей деятельности. Со временем появления на Земле человек начинает наблюдать и преобразовывать окружающий его мир. Таким образом, можно утверждать, что наблюдение было первым методом познания окружающего мира. По мере повышения уровня интеллектуальной деятельности человека в ходе его развития пассивное наблюдение превращается в активное, направленное на установление связей между предметами и явлениями.

Научное наблюдение характеризуется однозначностью замысла, т.е. целенаправленностью, объективностью, достигаемой использованием различных приборов, и возможностью воспроизведения результатов повторным наблюдением или с помощью других методов исследования.

Чтобы наблюдение было результативным, оно, во-первых, должно иметь четко поставленную задачу, во-вторых, быть целенаправленным и активным /в процессе наблюдения следует фиксировать только необходимые для решения поставленной задачи данные и активно их изыскивать исходя из многообразия условий поведения объекта/ и, в-третьих, проводиться планомерно и систематично.

Однако сколь бы тщательно ни было организовано наблюдение, оно как метод исследования ограниченно, что вытекает из пассивной позиции наблюдателя к объекту. Отсутствие возможности воздействовать на изучаемый объект при наблюдении привело к тому, что основным методом эмпирического познания в ряде прикладных наук, в том числе и металлургии, стал эксперимент.

Эксперимент – это метод познания, с помощью которого в контролируемых и управляемых условиях исследуются явления действительности. Эксперимент осуществляется на основе теории, определяющей постановку задачи и интерпретацию ее результатов. Нередко главной задачей эксперимента служит проверка гипотез и предсказаний теории, имеющих принципиальное значение /так называемый решающий эксперимент/. В связи с этим эксперимент как одна из форм практики выполняет функцию критерия истинности научного познания в целом.

Различают физический и математический эксперименты. Физический может быть лабораторным или производственным в зависимости от того, выполняется ли он на лабораторном оборудовании или на промышленных агрегатах в действующем цехе с ограниченными возможностями изменения состояния изучаемого объекта. Математический эксперимент обычно проводят на математических моделях, описывающих какие-либо физические объек-

ты или процессы. Физические и математические эксперименты успешно дополняют друг друга. Благодаря этому получение информации об объекте исследования менее трудоемко и более экономично.

Эксперимент обладает особенностями, отличающими его от наблюдения: исследуемые процессы должны быть организованы в точно учитываемых условиях, которые позволяют наблюдать за ними в процессе количественных измерений, воздействовать на их ход и воссоздавать каждый раз при повторении опыта.

Таким образом, в отличие от наблюдения при эксперименте исследователь не ограничивается пассивной ролью наблюдателя, а сознательно и активно вмешивается в естественное течение процесса. При этом варьируют технологические параметры, а в случае необходимости используют специально разработанные установки и измерительные устройства. Когда в связи с особыми свойствами объекта исследования непосредственное изучение его затруднено, прибегают к моделированию.

Моделирование – это метод исследования объектов познания на их моделях, которые являются аналогами, "заместителями" оригинала в познании и практике. Моделирование как особый случай эксперимента более детально рассматривается в соответствующих разделах.

Основой, источником и движущей силой познания служит общественная практика. Она ставит перед наукой все новые проблемы, требующие их решения. Одно из главных положений теории познания, которым должен руководствоваться научный работник в своей повседневной деятельности, вытекает из тезиса о том, что диалектический путь познания истины состоит в движении от живого созерцания к абстрактному мышлению и от него – к практике.

Следовательно, наблюдение, эксперимент должны быть неразрывно связаны с теорией, с процессом мышления. В свою очередь, мышление осуществляется как процесс построения понятий, суждений, систем суждений и целых теорий. Истинность понятий, суждений, теорий проверяется на практике. Общественная практика – единственно научный критерий истинности наших знаний.

Наблюдая и изучая предметы, явления, события, человек отражает их в своем сознании через величины, образы, сравнения с другими предметами, явлениями, т.е. получает информацию об окружающем мире. Информация – это сведения о чем-либо, отображение одного предмета или явления в другом. Так, информация о ходе металлургического процесса складывается из сведений о составе реагирующих фаз, температуре реакции, давлении, при котором идет процесс, времени его протекания и др. Информацию о качеств-

ве металла составляют показатели механических свойств, данные о химическом составе, содержании неметаллических включений и газов, внешних и внутренних дефектов изделия.

Научное исследование начинается с постановки проблемы. Проблема – это объективно возникающий в ходе развития познания вопрос или целостный комплекс вопросов, решение которых представляет существенный георегический или практический интерес. Проблемы возникают из потребностей практической деятельности человека в виде некоторого стремления к новому знанию.

Для постановки проблемы и ее решения требуются факты. Факт называется реальное явление, событие, результат, нечто конкретное и единичное в отличие от абстрактного и общего. Фактами следует считать, в первую очередь, положения, полученные эмпирическим путем, т.е. посредством наблюдения, эксперимента. Фактами современной науки являются как результаты эмпирического научного наблюдения, так и законы, достоверность которых установлена на практике.

Одновременно с проведением либо по окончании наблюдения или эксперимента исследователь в качестве орудия познания привлекает мышление. Основными видами мыслительной деятельности в процессе исследований и обсуждения их результатов являются анализ и синтез.

Анализ есть мысленное разложение предмета или явления на составляющие его части или стороны. Так, анализ выпуска металла из печи показывает, что при падении струи в ковш происходят следующие процессы: аэрогидродинамические /дробление струи в результате ее турбулентности и механического взаимодействия с окружающей атмосферой/, физико-химические /окисление металла и его примесей при взаимодействии с кислородом воздуха/ и теплообменные /погори теплоты металлом в окружающую среду/. Следовательно, для более глубокого познания явления необходимо изучать каждый из этих процессов.

Синтез есть мысленное объединение расщепленных анализом элементов. После изучения каждого из процессов, указанных в приведенных примерах, исследователь мысленно синтезирует их, устанавливает взаимное влияние и получает общее, более полное представление о наблюдаемом явлении.

В зависимости от соотношения эмпирического и теоретического уровней познания при изучении предметов, явлений различают два основных метода познания: дедуктивный и индуктивный.

Дедукция есть процесс аналогического рассуждения от общего к частному или к менее общему. Наиболее характерным видом дедукции является

аксиоматический метод, при котором основные утверждения выводятся логическим путем на базе одной или нескольких аксиом, принятых исходных положений или посугутов. Главнейшие положения аксиоматического метода были разработаны Пифагором и Евклидом и доведены до совершенства Лобачевским и Гауссом.

Индукция – это процесс выведения общего положения из наблюдения ряда единичных величин. Наиболее законченное представление об индуктивном методе впервые было огражено в работах Галилея, который вплотную подошел к современным позициям научно-прикладного исследования. Индуктивный метод может быть представлен в виде следующих основных элементов:

восприятие явления посредством наблюдения или эксперимента;
построение на основе обсуждения имеющихся данных рабочей гипотезы, механизма явления, процесса, которые разъясняют все частные известные явления;

построение математической теории, гипотезы или математического описания механизма процесса в целом;

проверка теории на практике, которая служит критерием истинности разработанной теории.

Одним из этапов исследования является разработка гипотезы. Гипотеза – это научное допущение или предположение, истинное значение которого не определено. Задача гипотезы – раскрыть те объективные связи и соотношения, которые могут быть главными для изучаемого явления. После проверки гипотеза превращается либо в достоверную теорию, либо в достоверное знание определенного факта. При решении инженерных задач гипотеза используется как формулировка или предложение возможного пути поиска. Следовательно, любой инженерный эксперимент должен выполняться только при наличии первоначальной гипотезы.

Первоначальные гипотезы в процессе исследования, как правило, неоднократно подвергаются анализу, критике, уточнению и в результате становятся более дооформленными. Непреложное требование к рабочей /первоначальной/ гипотезе – отсутствие в ее основе положений, противоречащих установленным законам природы. Научная гипотеза должна иметь следующие свойства: проверяемость, определенную предсказательность и общность для явлений одного класса, логическую непротиворечивость.

В ряде случаев выдвижение гипотезы происходит через интуицию. Интуиция – способность постижения истины путем прямого ее усмотрения без обоснования с помощью доказательств. Она представляет собой своеобразный тип мышления, когда отдельные звенья процесса мышления проходят более

или менее бессознательно, а предельно ясно сознается именно итог мысли – истина. Интуиции бывает достаточно для усмогрения истины, но ее недостаточно, чтобы убедить в этой истине других и самого себя. Для этого необходимо доказательство. Интуиция, как правило, возможна лишь при наличии определенных знаний и большого опыта теоретического и практического мышления.

При обсуждении результатов экспериментов, выдвижении гипотез в процессе мышления у исследователя возникают идеи. Идея – это мысль, достигшая высокой степени объективности, полноты и конкретности и в то же время нацеленная на практическую реализацию; это отражение действительности и целевого устремления. Генерация идей должна быть неотъемлемой особенностью деятельности и мышления исследователя, так как без новых идей невозможно развитие науки и техники. На пустом месте ничего не создается: всякой идее, изобретению предшествуют какие-то базисные знания, научные открытия или ранее сделанные изобретения. Прежде чем эти знания воплотятся в разработки, изобретения, проходит некоторое время – так называемый период вызревания идеи. По подсчетам американских ученых, на каждый используемый в производстве результат научно-исследовательской работы /НИР/ приходится 8 патентов /авторских свидетельств/, 98 технически осуществимых решений и 540 идей.

Контрольные вопросы

1. Основные цели познания в эпоху НТР.
2. Чем отличаются и чем связаны между собой эмпирическое и теоретическое познание при достижении конечного результата?
3. Что необходимо обеспечить для результативности наблюдения?
4. В чем отличие результатов, полученных в процессе наблюдения и эксперимента?
5. Место и роль общественной практики в познании.
6. В чем выражается взаимосвязь анализа и синтеза при изучении процессов и явлений?
7. Какие вы знаете науки, созданные на основе дедуктивного метода?
8. Как гипотеза превращается в теорию?
9. Роль идей в развитии науки и техники.

Глава 2. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ НИР

§ 1. Цели и задачи научных исследований

Цели конкретных исследований могут быть весьма разнообразными: от установления фундаментальных законов /например, исследование взаимодействия материальных частиц/ до решения небольшого прикладного вопроса /определение вязкости шлака заданного состава/. От выбора цели зависят, какие решаются задачи: математические, логические, физические и др. Но в любом случае необходим сознательный поиск средств, обеспечивающих достижение конечного результата.

Успешному проведению НИР способствует правильное определение стратегии и тактики. Стратегия исследования есть выбор направления и способа ведения научных исследований, обеспечивающих достижение поставленной цели. Под тактикой понимают совокупность действий по организации усилий исследователей и созданию всех необходимых условий для достижения положительного результата. Из нескольких возможных способов действия руководитель научного исследования должен выбрать наилучший. Все многообразие вопросов, решаемых руководителем, сводится к двум: получение максимального результата при заданных затратах или достижение заданного результата при минимальных затратах.

Научно-исследовательская деятельность связана с расходами на оплату труда научного персонала, приобретение оборудования, материалов, командировок и т.п. Поэтому один из важнейших вопросов тактики исследования – целесообразное, экономное расходование денежных средств.

В зависимости от поставленных целей, решаемых задач и применяемых методов научные исследования могут быть разделены на три группы: поисковые теоретические, целенаправленные фундаментальные и прикладные.

Поисковые теоретические исследования выполняют ученые, которые имеют глубокие знания, большой опыт научной работы и свободны в выборе направления исследований и использовании средств.

Целенаправленные фундаментальные исследования нацелены на дальнейшее познание человеком законов природы. Такие исследования проводятся коллективно большими специализированными группами или целыми организациями, руководимыми крупными учеными /например, по физике твердого тела, молекулярной биологии и др./.

Прикладные исследования направлены на разработки новых веществ, технологических процессов, агрегатов и оборудования. Такие исследования решают строго поставленные задачи. Базой прикладных работ являются

открытия и достижения фундаментальных наук /математики, физики, химии, геологии и др./. В черной металлургии чаще всего выполняются прикладные исследования.

По характеру финансирования НИР подразделяются на госбюджетные и хоздоговорные. Госбюджетные работы финансируются из средств, отпускаемых научно-исследовательскому учреждению через ведомство, которому оно подчинено, хоздоговорные – предприятиями и ведомствами заинтересованных отраслей народного хозяйства на основе специально заключаемых хозяйственных договоров.

Непосредственная цель прикладных наук, к которым относится и металлургия, – применение результатов фундаментальных наук для развития познания и решения социально-практических проблем. Основные цели научных исследований в черной металлургии: быстрейшее внедрение новых высокопроизводительных автоматизированных металлургических процессов и агрегатов /включая непрерывные/ при обеспечении пропорционального развития всех видов передела в металлургии; экономия энергетических и материальных ресурсов; повышение производительности труда на металлургических заводах, снижение трудоемкости работ и уменьшение доли ручного труда на всех участках производства; повышение качества выпускаемой продукции и изготовление новых видов продукции, отвечающих уровню мировых стандартов и превышающих их; использование социальных резервов производства; разработка мероприятий по охране окружающей среды. Этим целям соответствуют главные направления научных исследований в черной металлургии.

1. Разработка новых экономичных высокопроизводительных металлургических процессов, конструкций агрегатов и оборудования, обеспечивающих выпуск продукции высокого качества.

2. Совершенствование существующих технологических процессов для увеличения выпуска продукции, повышения ее качества при снижении расхода материалов и экономии энергии.

3. Совершенствование конструкций действующих металлургических агрегатов для увеличения их производительности, упрощения обслуживания и повышения качества продукции.

§ 2. Организация научных исследований в черной металлургии

Исследования в черной металлургии ведут научные учреждения различного профиля и непосредственно металлургические предприятия. Все эти учреждения могут быть разделены на три основные группы.

Институты Академии наук разрабатывают фундаментальные проблемы различных переделов металлургии. Их тематика включает в себя исследования по теории металлургических процессов, поиски новых принципиальных решений для разработки перспективных металлургических процессов, создание принципиально новых материалов и приборов, исследования на уникальном оборудовании, составление научных прогнозов. В этих институтах сосредоточена сравнительно малоочисленная, но наиболее квалифицированная часть ученых. К важнейшим академическим институтам, ведущим исследования в черной металлургии, относятся Институт металлургии им. А.А. Байкова /Москва/, Институт проблем литья /Киев/, Институт металлургии Уральского научного центра /Екатеринбург/, Институт электросварки им. Е.О. Патона /Киев/.

Отраслевые институты и заводские лаборатории призваны служить связующим звеном между фундаментальной наукой и производством, решать конкретные задачи технического прогресса, относящиеся к разработке новых и совершенствованию существующих технологических процессов, агрегатов и оборудования.

Крупнейшими в отрасли являются: Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина /ЦНИИЧермет, Москва/, Институт черной металлургии /ИЧМ, Днепропетровск/, Украинский научно-исследовательский институт металлов /УкрНИИМ, Харьков/, Уральский научно-исследовательский институт черных металлов /УИМ, Екатеринбург/, Челябинский научно-исследовательский институт металлургии /ЧелябНИИМ/, Донецкий научно-исследовательский институт черной металлургии /ДонНИИЧермет/.

Для улучшения связи науки с производством, сокращения сроков создания и освоения новой техники и технологии, повышения ее качества организуются научно-производственные объединения /НПО/ и инженерные центры. НПО представляет собой единый научно-производственный и хозяйственный комплекс, в состав которого входят научно-исследовательские, проектно-конструкторские, технологические организации, опытные производства и заводы по серийному выпуску продукции.

Важное звено в организации научных исследований представляют центральные заводские лаборатории /ЦЗЛ/, задачи которых - проведение исследований в масштабах своего предприятия, контроль за выполнением плана исследований, проводимых на предприятии другими научно-исследовательскими учреждениями, разработка технологических инструкций, контроль за их соблюдением и др.

В вузах исследования, проводимые в области фундаментальных и прикладных наук, тесно связаны с подготовкой инженеров и научных работников. Особенность институтов и университетов в том, что в них работают высококвалифицированные ученые различных специальностей, способные комплексно решать крупные проблемы. Участие в научной работе позволяет повышать квалификацию профессорско-преподавательского состава, углублять знания студентов и прививать им навыки исследователя.

Научно-педагогические работники вузов выполняют как государственные, так и хоздоговорные НИР. Административное руководство НИР на кафедрах и в лабораториях вуза осуществляется научно-исследовательская часть /НИЧ/ или научно-исследовательский сектор /НИС/, научное руководство – профессорско-преподавательский состав кафедр. Непосредственный исполнитель – соответствующий персонал НИЧ или НИС. Для решения важных проблем в вузах организуются проблемные и отраслевые лаборатории.

К главнейшим вузам СССР, ведущим исследования в черной металлургии, относятся Московский институт стали и сплавов /МИСИС/, Днепропетровский metallurgical институт /ДМетИ/, Сибирский metallurgical институт /СМИ, Новокузнецк/, Мариупольский metallurgical институт /МарМИ/, Magnitogorskий горно-metallurgical институт /МГМИ/, Donetskий политехнический институт /ДПИ/, Уральский политехнический институт /УПИ, Екатеринбург/.

Основные структурные подразделения НИИ – отделы и лаборатории, а вузов – кафедры и лаборатории. Отделы НИИ обычно специализируются по основным metallurgical переделам /доменному, сталеплавильному и др./ или по главным проблемам отрасли. Внутри отделов есть лаборатории, разрабатывающие основные научные направления исследований.

Для выполнения конкретной НИР создается рабочая группа из лиц, наиболее подходящих по своим данным для предстоящего исследования, состав которой определяется содержанием и объемом работы. После завершения запланированной работы группа может быть в прежнем или в измененном составе переведена на выполнение другой темы либо расформирована, а ее участники перераспределены между другими группами.

§ 3. Научно-исследовательская работа студентов /НИРС/

Ускорение НТИ требует выполнения различных исследований на всех уровнях инженерной деятельности. Первоначальные навыки проведения научных исследований, участие в которых способствует углублению знаний и развитию творческого мышления, студенты получают в период учебы.

НИРС организуют в двух формах.

Первая из них выполняется в соответствии с учебными планами в виде учебно-исследовательских /УИР/, курсовых научно-исследовательских /КНИР/ и дипломных /ДР/ работ. УИР представляет собой комплекс лабораторных работ, объединенных общими задачей и методикой, или одну сложную работу, позволяющих получить достаточное количество данных для нетрадиционных выводов и обобщений. КНИР выполняют по определенной тематике в течение одного или нескольких семестров. Задание на КНИР предусматривает использование нескольких видов исследований в целях получения достаточного количества данных для глубокого их обобщения. При выполнении КНИР студенты проводят теоретические, лабораторные и промышленные исследования, что позволяет расширить их кругозор по целому ряду дисциплин, в том числе и не изучаемых в вузе.

Вторая форма состоит в привлечении студентов к участию в плановых госбюджетных и хоздоговорных работах, проводимых кафедрами и лабораториями вуза. Для этого кафедры составляют планы НИР с учетом соответствия их читаемым дисциплинам или профилю подготовки специалистов.

Наилучшие результаты получаются при сочетании обеих форм НИР.

Наиболее результативными видами НИРС являются КНИР и ДР, направленные на решение новой научной или научно-прикладной задачи. На эти виды работ руководитель выдает задание, в котором определяет цель, указывает основные виды и методы исследований, конкретные сроки их выполнения, а также основную литературу. После просмотра и анализа литературы студенты составляют литературный обзор, в котором отражают состояние исследуемого вопроса и намечают пути достижения поставленной цели. Теоретические и лабораторные исследования студенты проводят самостоятельно под наблюдением руководителя, аспирантов, научных сотрудников. Основная задача студентов – самостоятельно освоить определенные методы и приемы выполнения различных работ. Исследования в промышленных условиях студенты проводят во время производственных практик или при работе по индивидуальному графику.

На конечной стадии выполнения КНИР и ДР студенты обрабатывают полученные результаты, оформляют их в виде таблиц, графиков, формул, обсуждают и вырабатывают основные выводы и предложения. К концу установленного срока студенты пишут отчеты о КНИР, которые защищают перед комиссией, состоящей из преподавателей и научных сотрудников, под руководством и наблюдением которых выполнялась работа. ДР защищают в установленном порядке на заседании ГЭК.

§ 4. Планирование и выбор темы исследования

В зависимости от важности поставленных целей, объема решаемых задач, связи их с одной или с несколькими отраслями промышленности заинтересованные организации и предприятия разрабатывают различные виды программ и планов НИР.

Целевые комплексные научно-технические программы составляются для реализации в больших масштабах наиболее значительных научно-технических достижений и включают в себя комплекс научно-исследовательских, проектно-конструкторских работ, направленных на создание и освоение новых технологических процессов, выпуск новых машин, оборудования, материалов.

Программы по решению важнейших научно-технических проблем включают в себя проблемы, имеющие важное народнохозяйственное значение и обеспечивающие задел научных исследований на предстоящий период.

Планы НИР разрабатываются для проблем, решение которых не связано с широким внедрением новой техники и технологии в народное хозяйство; их исполнители – в основном НИИ.

В деятельности научного подразделения /кафедры, отдела, лаборатории/ очень важен выбор научного направления и темы исследования. Обычно направление научной работы градационно и складывается годами. Оно определяется наличием кадров соответствующей квалификации, научными интересами работников, оснащенностью оборудованием и приборами. Выбор тематики НИР в известной степени зависит от подготовленности кадров, особенно ведущих, к которым относятся руководители научных подразделений, группы и высококвалифицированные работники, имеющие ученые степени и звания.

Однако прежде всего тема исследования должна соответствовать общественной потребности, определяемой выпуском достаточного количества продукции высокого качества.

Для оформления и включения работы в проект плана научного учреждения подготавливается необходимая документация. Одним из важных документов является технико-экономическое обоснование /ТЭО/ НИР, в котором должны быть освещены: состояние научной проблемы или задачи, подлежащей исследованию; цель работы в научном или техническом плане; новизна проводимой работы, заключающаяся в использовании авторских свидетельств сведения о предполагаемом внедрении; природоохранные мероприятия; предварительный расчет экономического эффекта.

§ 5. Основные виды исследований в металлургии

По характеру поставленных целей, решаемых задач и применяемых методов научные исследования могут быть разделены на следующие виды.

Анализ научной информации, содержащейся в литературе, патентной документации, диссертациях, отчетах о НИР и др., проводится для определения возможных направлений и конкретных методов исследования, а также для углубления знаний по изучаемому вопросу. При выполнении практически всех исследований составляется обзор литературы.

Теоретические исследования и обобщения выполняют для определения принципиальных возможностей выбранного направления путем анализа заранее известных закономерностей, результатов проведенных экспериментов, подготовки предварительной гипотезы, подведения итогов оконченного исследования и разработки новых теоретических положений.

Лабораторные исследования проводят в целях изучения свойств веществ, материалов и закономерностей металлургических процессов. Эти цели во многом определяются размерами оборудования. При достаточной мощности с помощью лабораторных установок можно разрабатывать или уточнять отдельные элементы технологии металлургических процессов и даже создавать новые технологические процессы.

Полупромышленные или опытно-промышленные исследования проводятся на опытном оборудовании, имеющем большие размеры, чем лабораторные установки, и содержащем все главные элементы промышленных агрегатов, или на промышленных установках, специально выделенных или сооруженных для решения исследовательских задач. Основные цели таких исследований – создание новых технологических процессов, уточнение элементов технологии, разработка или совершенствование конструкций узлов или агрегатов.

Исследования на промышленных агрегатах проводят для совершенствования технологических процессов и оборудования в целях повышения производительности и улучшения качества продукции. Особенность большинства промышленных исследований заключается в том, что они осуществляются на агрегатах, выпускающих товарную продукцию, а это усложняет выполнение производственного плана. Принципиально новая технология разрабатывается непосредственно на действующих промышленных установках только тогда, когда ее внедрение позволит увеличить объем и повысить качество выпускаемой продукции:

Наиболее масштабные разработки новых технологических процессов проводятся с использованием всех указанных видов исследования. Тогда исследование включает такие этапы:

1. Определение цели и возможных путей ее достижения. Разработка технического задания, плана и программы исследований.

2. Предварительный анализ имеющейся научной информации. Установление характера решаемых задач.

3. Сооружение лабораторной установки и проведение на ней исследований.

4. Анализ данных лабораторных исследований и дополнительной научной информации, разработка рабочей гипотезы и выбор технических решений для строительства полупромышленной или опытно-промышленной установки.

5. Сооружение опытно-промышленной или полупромышленной установки и проведение на ней исследований.

6. Обобщение данных опытно-промышленных или полупромышленных исследований, уточнение ранее разработанных теоретических положений и нахождение основных конструктивных и технологических решений для строительства промышленных установок и цехов.

7. Строительство промышленных установок, цехов, отработка технологии процесса и доработка конструкций оборудования.

8. Разработка окончательной теории вопроса или ее уточнение.

9. Совершенствование технологии процесса, конструкций агрегатов и оборудования в целях повышения их производительности и улучшения качества продукции на основе разработанной теории.

По окончании каждого этапа уточняются содержание работ, план и программа следующего этапа. В такой последовательности разрабатывались, например, технологии кислородно-конвертерного процесса, непрерывной разливки стали, производства окатышей. Нередко научные работники выполняют только отдельные этапы общего исследования или их части. В таких случаях применяемые виды исследования зависят от частных целей и задач. Если в ограниченный срок выполняется сложная и трудоемкая НИР, можно проводить одновременно несколько этапов исследования. При этом от руководителя работы требуется тщательная ее координация для обеспечения взаимосвязи этапов.

Выбор видов исследований зависит от следующих факторов.

Цель и задачи исследования. Чтобы выбрать состав шлака с требуемыми свойствами, достаточно провести теоретические и лабораторные исследования и обобщить их результаты. Если нужно проверить эти шлаки в определенных технологических условиях, проводят и промышленные испытания.

Наличие кадров соответствующей квалификации. Этот фактор имеет существенное значение при проведении глубоких теоретических исследований, математическом моделировании, работе на сложном оборудовании.

Наличие необходимого оборудования - обязательная предпосылка проведения лабораторных или опытно-промышленных исследований.

Объем финансирования определяет численность привлекаемого научного персонала, возможности приобретения оборудования и материалов, оплату услуг сторонних организаций.

Сроки проведения исследований. При ограниченных сроках иногда приходится отказываться от некоторых видов исследований, связанных с большими затратами времени.

Соотношение различных видов работ зависит от общей направленности исследования /теоретическое или прикладное/. После установления основных видов работ выбирают конкретные методы выполнения отдельных этапов исследования.

§ 6. Составление технического задания и рабочего плана проведения исследования

После определения и утверждения темы исследования составляют техническое задание на проведение НИР /ТЗ НИР/, которое в общем случае состоит из следующих разделов.

1. Основание для проведения работ.
2. Цель и исходные данные.
3. Этапы НИР. Разбивка на этапы должна в целом ограждать объем исследований. Обычно этапы приурочиваются к кварталам или к полугодиям.
4. Основные требования к выполнению НИР.
5. Способ реализации результатов НИР.
6. Перечень технической документации, предъявляемой по окончании работы.

7. Порядок рассмотрения и приемки НИР.
8. Технико-экономическое обоснование /эффективность результатов выполненной НИР/.

Вместе с техническим заданием составляется смета на НИР, в которой указывают: основные статьи затрат; заработную плату научного персонала; расходы на научные командировки, проведение экспериментов, приобретение оборудования; оплату за услуги других организаций. Кроме того, на каждую работу составляют регистрационную и информационную карты Всесоюзного научно-технического информационного центра /ВНТИ/ по установленной форме. Все документы подписывают руководители рабо-

ты, отдела или кафедры и учреждения, выполняющего НИР, и передаются в учреждение или на предприятие, заказавшее или финансирующее работу. Для планирования отдельных этапов НИР составляют рабочие планы, в которых отражают: цели и задачи НИР или отдельных ее этапов; виды и методы исследований, используемые при выполнении НИР; содержание конкретных исследований, сроки их выполнения и исполнителя. Техническое задание и рабочие планы согласовываются со всеми соисполнителями и утверждаются руководителями научного учреждения и заказчика НИР.

§ 7. Составление научных прогнозов

При составлении планов развития науки и техники, особенно перспективных, широко используют научные методы прогнозирования. Прогнозирование НТП является составной частью системы планирования и включает в себя ряд огадий: анализ достигнутого уровня и сложившихся тенденций развития; формирование целей НТП на определенный период; разработку системы мероприятий, наиболее эффективно обеспечивающих достижение поставленных целей.

Методы прогнозирования развития народного хозяйства и науки выбирают в зависимости от срока, на который рассчитывается прогноз /времени утверждения/, и его задач.

Экстраполяция применяется, если объект прогнозирования можно представить в виде математической функции; тогда используются известные в математике приемы продолжения динамического ряда данных с учетом условий места и времени и других ограничений.

В целях выработки прогноза чаще всего выполняют предметно-математическое моделирование, при котором изучаемый процесс, объект или явление отображают системой математических уравнений, описывающих известные соотношения между отдельными элементами объекта, процесса, явления. Затем на аналоговых или на цифровых ЭВМ решают эту систему уравнений применительно к рассматриваемым условиям.

Экспертиза /метод экспертических оценок/ по сути заключается в обобщении и статистической обработке мнений компетентных специалистов относительно перспектив развития той или иной области и смежных областей. Для этого разрабатывают подробные вопросы, которые вручаются ведущим специалистам и экспертам соответствующей области науки и техники. Вопросы в анкетах ставятся таким образом, чтобы ответы на них имели какую-либо количественную характеристику. Опрос экспертов проводится в несколько туров, в ходе которых вопросы и ответы уточняются, а результаты последних обрабатываются методами математической статистики.

Контрольные вопросы

- I. На какие группы делятся научные исследования?
 2. Цели и задачи прикладных исследований.
 3. В чем различие тематики академических и отраслевых институтов?
 4. Какими особенностями обладают вузы при проведении НИР?
 5. Что такая рабочая группа и для чего она создается?
 6. Особенности НИР.
 7. Чем определяется выбор темы исследования?
 8. На какие виды делятся научные исследования?
 9. Перечислите основные этапы исследований.
 10. Какие факторы определяют выбор вида исследования?
- II. Основные методы составления научных прогнозов и их сущность.

Глава 3. ПОИСК И ОБРАБОТКА НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

§ 1. Источники научной информации

Неотъемлемая часть деятельности исследователя – работа с источниками научной информации, так как извлекаемые из них данные используются практически на всех этапах исследования. Полный и правильный анализ этих данных имеет большое значение для эффективности НИР.

Одна из важнейших особенностей НИР – резкое увеличение потока информации /информационный взрыв/: количество научных публикаций удваивается каждые 10–15 лет. Такая закономерность есть следствие быстрого обновления знаний во всех областях, она обуславливает возрастную важность научно-информационной деятельности, правильной ориентировки в этом потоке. С другой стороны, ускоренное обновление знаний чаще всего позволяет получить 80–90% необходимых сведений в источниках, появившихся за последние 7–10 лет.

Научная информация закрепляется и передается прежде всего посредством научных документов, которые подразделяются на опубликованные и неопубликованные. К первым относятся книги, журналы, бюллетени, государственные стандарты, описания изобретений и др. Вторые выполняются без применения средств полиграфии и содержат отчеты о НИР, диссертации, алгоритмы, депонированные рукописи, неопубликованные переводы и др.

Существует два вида информации: первичная и вторичная.

Первичная информация непосредственно отображает данные изучения какого-либо вопроса. Ее источники – прежде всего научные журналы, где,

как правило, впервые публикуются результаты исследований, а также сборники научных трудов, тезисы докладов и материалы научных конференций, монографии, отчеты о НИР.

Наиболее важные отечественные журналы, в которых публикуются статьи по вопросам черной металлургии: "Сталь", "Металлург", "Известия высших учебных заведений. Черная металлургия", "Известия Академии наук СССР. Металлы". Все эти журналы публикуют главным образом первичную информацию в виде статей различных направлений. Вопросы черной металлургии освещены также и в журналах по смежной тематике: "Литейное производство", "Огнеупоры", "Заводская лаборатория". Нужные сведения можно почерпнуть из журналов по наукам, на которых базируется металлургия.

Вторичная информация получается в результате аналитико-синтетической переработки научных документов. Чаще всего она представляется в виде рефератов и обзоров. Для металлургов главным ее источником является "Реферативный журнал. Металлургия", выпускаемый Всесоюзным институтом научной и технической информации /ВИНИТИ/. В нем содержатся рефераты статей, монографий, учебных пособий и описаний изобретений по всем разделам черной металлургии, опубликованных на разных языках мира. Для удобства пользования наряду со сводным томом печатаются его тематические выпуски, например, "Теория металлургических процессов", "Металлургия чугуна и стали". В ВИНИТИ издается также тематический библиографический указатель "Сигнальная информация. Металлургия".

Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований черной металлургии /Чермет-информация/ выпускает бюллетень научно-технической информации "Черная металлургия", в котором публикуются как первичная, освещавшая опыт различных заводов и институтов, так и вторичная информация - обзоры состояния производств черной металлургии и горнорудной промышленности. Этот институт выпускает также тематические серии "Черная металлургия. Экспресс-информация" и "Черная металлургия. Обзорная информация".

Из других источников вторичной информации следует отметить "Сборник рефератов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ", выпускаемый ВНИИЦ.

Сведения об исследовательских работах, помещенных в зарубежных источниках информации и переведенных на русский язык, могут быть найдены в указателях переводов, выпускаемых Всесоюзным центром переводов научно-технической литературы и документации /ВЦП/, Государственной публичной научно-технической библиотекой /ГПНТБ/ и Всесоюзным научно-исследовательским институтом патентной информации /ВНИИПИ/.

Основной вид патентной документации – описания изобретений, которые издаются в виде листков или брошюр для каждого изобретения отдельно. Сведения о патентах /авторских свидетельствах/ публикуются также в виде рефератов или формул изобретений. Наиболее важные источники патентной информации: бюллетень "Открытия и изобретения", в котором печатаются формулы изобретений, основные чертежи или схемы; реферативный журнал "Изобретения в СССР и за рубежом", который содержит оригиналы рефератов и их переводы на русский язык.

В ряде случаев источниками научной информации по отдельным вопросам могут быть монографии, ценность которых состоит в том, что затронутые в них проблемы или темы освещены с достаточной глубиной. Многие общие сведения, особенно из смежных отраслей знаний, могут быть получены из учебников и учебных пособий.

§ 2. Методы поиска научной информации

Резкое увеличение потока информации в эпоху НТР затрудняет поиск нужных документов. Для систематизации литературных источников /статьей в журналах, книг/ и облегчения их поиска с конца 70-х годов в научно-технических библиотеках используется Библиотечно-библиографическая классификация /ББК/, по которой вся совокупность знаний разделена на 21 отдел. Каждый из отделов обозначается прописной буквой русского алфавита. Так, буквой Д обозначается наука о земле, Е – биологические науки и проч. Отделы дробятся на рубрики, обозначаемые цифрами; каждая из последующих цифр представляет собой более частные дисциплины или отрасли деятельности.

Вместе с тем в научно-технических библиотеках для индексации естественных и технических наук используется Универсальная десятичная классификация /УДК/. При этом математика и естественные науки /физика, химия/ включены в отдел 5, а прикладные науки – в отдел 6. Каждый из отделов разбивается на 10 подотделов, которые, в свою очередь, подразделяются на 10 подчиненных рубрик, и т.д.; 10-12 цифр вполне достаточно для индексирования самого узкого понятия.

Черная металлургия как прикладная наука имеет индекс 669., некоторые основные ее разделы индексированы следующим образом: 669.I – производство чугуна и стали /общая рубрика/; 669.16 – производство чугуна; 669.18 – сталеплавильное производство; 669.183 – марганцовское производство; 621. – литье; 621.746.58 – разливка в изложницы. Если документ содержит материалы нескольких подразделений, то в индекс входят обозначения всех этих рубрик, например: 621.746.58:669.18 – раз-

ливка стали в изложница. Пользование классификацией упрощает алфавитно-предметный указатель; по которому, руководствуясь названием предмета поиска, можно отыскать номер рубрики.

Патентные документы в нашей стране и большинстве зарубежных стран систематизируются по Международной классификации изображений МКИ, которая содержит восемь разделов, обозначаемых прописными латинскими буквами от А до Н. Разделы делятся на классы, индексы которых состоят из соответствующей буквы и числа от 01 до 99. Классы делятся на подклассы, обозначаемые прописными буквами латинского алфавита, а те, в свою очередь, - на группы и подгруппы, в индексах которых входят числа, разделенные косой чертой. Металлургические процессы включены в раздел С, который объединяет химию и металлургию, а разливка стали - в раздел В, объединяющий различные технологические процессы. Приведем индексы некоторых важных для металлурга рубрик: С 21 В 7/00 - доменные печи; С 22 В 1/14 - агломерация, брикетирование, окускование, гранулирование; С 21 С 5/04 - получение стали в плазменных печах; С 21 С 5/28 - получение стали в конвертерах; С 21 С 5/52 - получение стали в электрических печах; В 22 Д 7/00 - отливка слитков; В 22 Д 11/00 - непрерывное литье металлов. Для поиска индексов используется "Алфавитно-предметный указатель МКИ".

Опубликованная информация /фонды/ прежде всего хранится в библиотеках, начиная от библиотек учреждений или предприятий до центральных. Наиболее значительны Государственная библиотека СССР им. В.И. Ленина /ГБЛ/ и Государственная публичная научно-техническая библиотека /ПНТБ/. Центральным хранилищем патентной информации является Всесоюзная патентно-техническая библиотека /ВПТБ/. Фонды неопубликованной информации находятся в отделах /бюро/ научно-технической информации учреждений, предприятий, в отраслевых и территориальных центрах технической информации, ВНИИЦ. В ПНТБ наряду с фондом изданий есть специализированные собрания промышленных каталогов, ведомственной литературы, переводов научно-технической литературы и документации.

Книги или статьи в библиотеках можно найти по каталогам разных видов. В алфавитном каталоге описания изданий располагаются в алфавитном порядке фамилий авторов, наименований коллективов и названий произведений. При тематическом поиске литературы пользуются систематическим каталогом, где описания распределены по отраслям знания согласно ББК или УДК, и предметным каталогом, в котором рубрики размещены в алфавитном порядке их наименований. Для тематического поиска патентной информации обращаются к ее фондам, которые систематизированы по МКИ.

Другой способ поиска информации – просмотр библиографических пособий /указателей, списков, обзоров/, выпускаемых в различных формах /печатные издания, машинописные и ротапринтированные материалы, карточки, магнитофонные ленты, микрофильмы и т.д./. Их получают по разовым или постоянно действующим запросам из органов информации и крупных библиотек, имеющих библиографические отделы. Если необходимые источники отсутствуют в местных библиотеках, их заказывают по межбиблиотечному абонементу МБА/. Копии научных документов получают через ПНУБ, ВНИИЦ, ВПТБ, ВИП, ВНИТИ, отраслевые и территориальные информационные центры с оплатой по перечислению или наложенным платежом.

Существенную помощь в работе с литературой исследователю оказывают реферативные журналы, в которых отражается практически вся опубликованная информация. Наибольший интерес для металлурга представляет "Реферативный журнал. Металлургия". Чаще всего поиск начинают с просмотра реферативных журналов за определенный период /обычно за последние 7-10 лет/, предварительно воспользовавшись авторским и предметным указателями к журналу. Реферат раскрывает основное содержание документов, но некоторые моменты, несущественные, по мнению референта, и не освещенные в реферате, могут представлять интерес для исследователя. Поэтому на второй стадии поиска просматривают первичные документы /статьи, патенты, монографии и др./. При их изучении обращают внимание на прикнижные /приставочные/ библиографические списки. Благодаря этому число источников информации по интересующему вопросу увеличивается.

Для автоматизации поиска научной информации все шире используются ЭВМ, входящие в состав информационно-поисковых систем /ИПС/. На вход ИПС поступает информация, огражающая, с одной стороны, достигнутый уровень знаний, например, об устройствах, технологических процессах и т.д. /поисковый массив/, и с другой – информационную потребность абонентов /информационные запросы/ на естественном языке; затем информация индексируется, т.е. переводится на информационно-поисковый язык. При выявлении элементов информационного массива, отвечающего на запрос, система выдает документы /адреса их хранения/ либо загребованные фактические данные.

§ 3. Составление рефератов и обзоров

Основные формы работы над научно-технической литературой – конспектирование, анализирование и обобщение.

Конспектирование – это краткое изложение в письменной форме всего материала источника либо его частей, представляющих интерес. Оно слу-

жит для исследователя своеобразной тренировкой, позволяет правильно и скажо передавать мысли авторов. Выписки, которые делаются при чтении, значительно облегчают работу по изучаемой теме.

Наиболее распространены два способа ведения записей - на карточках и в тетрадях; каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Более удобно с точки зрения хранения и подборки материала по различным вопросам ведение карточки с использованием отдельных карточек. Недостаток данного способа - небольшой размер последних, что иногда приводит к необходимости изложения содержания статьи на нескольких карточках.

Недостатком другого способа является то, что при ведении конспектов по нескольким проблемам необходимо систематизировать материал; в этом случае требуется дополнительный указатель, позволяющий находить сведения по нужным вопросам. При большом объеме и числе проработанных источников /обычно свыше 100/ наиболее удобна смешанная форма, когда на карточках помещаются только аннотации, а более полно материал документов излагается в тетради. Тогда на карточке должна быть ссылка на соответствующую запись в тетради, а в тетради отмечен условный номер карточки.

При работе с научной документацией следует приводить библиографическое описание источника, откуда заимствованы те или иные сведения, по ГОСТ 7.1-84 "Библиографическое описание документа". Эти описания могут быть использованы при составлении списка литературы и строятся по такой схеме: фамилия и инициалы авторов; основное заглавие статьи, журнала, книги, сборника; место издания; название издательства или издающей организации; год издания; том; номера страниц, на которых помещена статья или общее количество страниц; сведения о наличии библиографии, иллюстраций.

Анализирование - процесс раскрытия внутреннего плана документа с использованием личных знаний и данных других работ. Эта операция аналогична составлению оглавления книги, отражающего ее композицию, и позволяет точно выявить авторский замысел, вскрыть недостатки работы и развивает у исследователя привычку следить за логикой изложения.

В процессе научной работы часто приходится делать обобщения в виде обзоров литературы или рефератов. Обзор - это скжатое, систематизированное, с выводами и рекомендациями изложение современного состояния проблемы, основных тенденций ее развития, рассматриваемых в первичных документах /статьях, книгах, патентах и т.п./, отобранных для его составления. Реферат - краткое изложение содержания произведения или издания /его части/ о основными фактическими сведениями и выводами.

Обзор литературы – неотъемлемая часть диссертаций и большинства отчетов о НИР. В обзоре должны быть освещены известные и неизвестные стороны изучаемого вопроса и сделаны соответствующие выводы. Проще всего определить известное, просмотрев достаточно много источников. Значительно труднее установить, что неизвестно, так как всегда могут быть источники, о существовании которых исследователь не знал или которые не мог разыскать. В этом случае особенно важны подготовленность и эрудиция научного работника. Иногда приходится обращаться за советом к более опытным и компетентным специалистам. Содержание выводов обзора должно соответствовать целям и задачам проводимой работы и представлять обобщение изученных источников информации. Рекомендуется следующий порядок работы над обзором.

1. Определение целей или задач. Обзор может охватывать либо все основные вопросы исследования, либо некоторые его аспекты: выбор метода и разработку методики, уточнение целей, обобщение результатов других работ и т.д.

2. Отбор информации. Включает в себя поиски источников, составление их перечня /картотеки/ и конспектирование.

3. Составление плана. Определяется целями обзора и наличием источников. Для его уточнения дополнительно просматривают конспекты.

4. Компоновка материала. Осуществляется согласно плану обзора. Если число источников велико /несколько десятков/, лучше сделать из конспектов соответствующие выписки, так как в одном и том же документе могут быть сведения, включаемые в разные части обзора. Выписки раскладывают в столбки по пунктам плана. Затем еще раз просматривают материал каждой столбки, чтобы установить соответствия или противоречия между разными источниками.

5. Написание обзора. Обзор должен быть логично построен /предпосылка – глашательная проработка плана/ и краток. Если в нескольких источниках имеются аналогичные данные, достаточно привести их один раз, сославшись на все эти источники. Хорошо написанный обзор литературы в среднем имеет на странице машинописного текста 5–10 ссылок. Важное требование к обзору – объективность, в нем необходимо отметить все противоречия между различными источниками, в том числе и расхождения с данными автора обзора. Выводы должны быть обоснованными и подтверждаться материалом обзора. В тексте ссылки на источники могут быть подстрочными /помещаются внизу страницы/ или внутритекстовыми /указываются по-рядковые номера по списку источников в квадратных скобках; в машинописных документах разрешается квадратные скобки заменять двумя косыми/. Список использованных источников должен содержать их перечень в порядке появления ссылок в тексте.

§ 4. Научная коммуникации

В эпоху НТР объем научной информации увеличивается значительными темпами; однако она быстро и устаревает. В связи с этим возрастает роль научной коммуникации, которая осуществляется в рамках системы циклического движения научной информации: это общение членов одного коллектива для получения новых знаний соавторство, передача полученной информации другим специалистам, популяризация, практическое использование знаний путем их сообщения инженерно-прикладной сфере. Формы научной коммуникации разнообразны.

Публикация. Если в ходе исследования получены новые данные, имеющие существенное научное или практическое значение, этот материал публикуют в виде статьи. Основная ее часть включает в себя следующие разделы: введение, аналитический обзор /обзор источников, постановка задачи/, методика исследований, содержание и результаты выполненной работы, выводы и предложения. Этот общий план может реализоваться по-разному в зависимости от соотношения между изложением методики, теоретических, экспериментальных, практических данных, содержания дискуссии.

Журналы обычно принимают статьи объемом не более пяти-шести машинописных страниц. Техническое оформление статьи должно соответствовать определенным требованиям, которые время от времени печатаются в журналах.

Личные контакты могут иметь самый широкий диапазон: от общения сотрудников лаборатории, отдела, кафедры до международных встреч. Личные контакты дают возможность наиболее полно обмениваться информацией. Однако не всегда рекомендуется сообщать сведения о незавершенных работах и тем более – о содержании заявок на авторские свидетельства, по которым не прекращено делопроизводство.

Переписку с исследователями ведут, например, для уточнения данных, которые не попали в опубликованные статьи, получения консультаций у известных специалистов по узким вопросам и пр.

Научные семинары проводятся по относительно узкому кругу вопросов, чаще всего внутри лабораторий, отделов, кафедр, иногда с привлечением специалистов из других организаций.

Научные конференции /эпизодические и периодические/ организуют крупные НИИ и вузы, занимающие ведущее положение в разработке рассматриваемых проблем; периодические конференции проводятся раз в два-пять лет. Извещения о проведении конференций рассылаются заинтересованным учреждениям, предприятиям и отдельным лицам заранее, чтобы дать

возможность подготовить тексты докладов, сообщений или их тезисы. Информацию публикуют в газетах докладов /материалах/ научной конференции или в сборниках научных трудов. Помимо прямой задачи – заслушивания и обсуждения результатов НИР и принятия соответствующих решений – на конференции налаживают личные контакты, которые способствуют обмену информацией.

Конгрольные вопросы

1. Какие существуют виды научных документов и виды информации и что в них входит?
2. Перечислите основные источники первичной и вторичной информации по черной металлургии.
3. Как построена индексация научных документов в системах ББК, УДК, МКИ?
4. Назовите наиболее значительные места сосредоточения научной информации.
5. Какие методы поиска научной информации наиболее часто используются?
6. Как правильно конспектировать научные источники?
7. Рекомендуемый порядок составления обзоров научной литературы.
8. Сущность научной коммуникации. Ее виды.

Глава 4. ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

§ 1. Эксперимент и его задачи

В общем виде понятие "эксперимент" /от лат. "проба", "опыт"/ обозначает чувственно-предметную деятельность в науке, а в более узком смысле – опыт, воспроизведение объекта познания, проверку гипотез и т.д. Эксперимент – это эмпирический метод познания, когда проводят не только наблюдения и измерения, но и, воздействуя на объект исследования, изучают его свойства, изменения, вызванные различными факторами и их сочетаниями, влияние одного фактора на другой и т.д. При экспериментальном исследовании изучаемый объект воспроизводят искусственно или создаются точно учитываемые условия, которые позволяют оценить как воздействие на объект, так и его изменения. Эмпирические методы играют большую роль в процессе познания. Они являются основой проверки гипотез, теоретических предпосылок и часто сами являются предметом нового открытия, новых научных исследований.

Основная задача эксперимента – получение новых знаний в процессе практического воздействия на внешний мир. Задачи эксперимента конкр-

тизируются в каждом частном случае. Это изучение свойств объектов, способов воздействия, управления, разработка и оптимизация технологических процессов и др. Характер задач меняется в зависимости от условий проведения эксперимента, видов проводимых исследований.

В металлургической науке /см. гл. 2/ проводят теоретические, лабораторные, опытно-промышленные /полупромышленные/ и промышленные исследования. Наиболее масштабные разработки содержат все указанные виды исследований как отдельные стадии. Возможно проведение эксперимента в три, две или в одну стадию. Исследование, включающее в себя все виды, проводится обычно в такой последовательности.

1. Определение цели и возможных путей ее достижения. Разработка технического задания, плана и программы исследований.

2. Анализ имеющейся научной информации. Уточнение характера решаемых задач.

3. Проведение лабораторных исследований, анализа их результатов, разработка рабочей гипотезы и выбор технических решений для строительства полупромышленной установки.

4. Проектирование, сооружение полупромышленной /опытно-промышленной/ установки. Проведение полупромышленных исследований.

5. Обобщение данных полупромышленных исследований, разработка технического задания на проектирование промышленных агрегатов, установок и др.

6. Проектирование и строительство промышленного агрегата, его освоение, доработка конструкции, оптимизация технологии, исследование качества продукции.

7. Разработка окончательной теории процесса, его совершенствование в промышленных условиях.

На каждом этапе работы решаются конкретные задачи.

§ 2. Особенности эксперимента в лабораторных и полупромышленных условиях

Некоторые задачи исследования в металлургии могут быть решены с помощью лабораторных экспериментов. Их данные затем используются при анализе различных технологических процессов, хотя в лаборатории невозможно воссоздать и учесть весь комплекс факторов, действующих в промышленных условиях. Обычно такие исследования проводятся по упрощенным моделям технологических процессов, и поэтому на их основании труд-

но количественно предсказать конечный результат производственного процесса в целом. Однако они позволяют создать качественную картину работы агрегата и количественно оценить отдельные элементы технологии.

При исследовании металлургических процессов в лабораторных условиях решаются такие задачи: определяются физико-химические свойства расплавов /плотность, вязкость, поверхностное напряжение, электропроводимость металла и шлака/, тепловые характеристики различных материалов /удельная теплоемкость, теплопроводность и др./, термодинамические и кинетические характеристики окислительно-восстановительных процессов, протекающих в металлургических агрегатах, а также активности элементов в металле и различных соединений в шлаке; моделируются технологические процессы и отдельные элементы технологии на базе теории подобия; разрабатываются основы новых технологических процессов и приемов, методы контроля и управления с последующей их проверкой на крупных лабораторных установках. Это позволяет оптимально использовать материальные средства, предотвратить непроизводительные затраты на сооружение неработоспособных агрегатов и механизмов.

Полупромышленными или опытно-промышленными исследованиями называются такие, которые проводятся на установках и агрегатах значительных размеров и производительности, имеющих все основные элементы для осуществления промышленной технологии /сырые материалы, готовую продукцию, контроль, механизацию, автоматизацию и управление технологическим процессом, конструкции агрегата/, а также на промышленных агрегатах, специально выделенных или построенных для проведения исследований или выпуска новых образцов.

Задача полупромышленных исследований – отработка в крупномасштабных условиях новых технологических и конструктивных решений перед их широким промышленным внедрением. Полупромышленные исследования – это переходная стадия от лабораторных разработок к внедрению новых технологий, конструкций, изделий. Наряду с техническими решениями на этой стадии изучаются вопросы экономики процесса, организации труда, управления процессом, качества продукции. Из технических решений на первый план выдвигаются такие, которые связаны с длительной непрерывной работой в условиях предприятия: надежность отдельных узлов агрегатов; стойкость их частей, особенно футеровки; совершенство методов контроля и управления процессом; возможность изменения сортамента выпускаемой продукции; использование различных видов сырья; условия ремонта оборудования и др. Затраты на полупромышленные исследования значительны, так как связаны с капитальными вложениями на строительство круп-

ных установок. Поэтому решение о проведении таких исследований принимается только после глубоких теоретических и лабораторных проработок при наличии технико-экономического обоснования.

Одной из основных баз опытно-промышленных исследований в черной металлургии является НИО "Тулачармет", где разрабатывались многие новые технические решения в области металлизации металлургического сырья, кислородно-конвертерного процесса, непрерывной разливки стали, электросталеплавильного производства. В последние годы здесь на 10-тонном конвертере отрабатывается технология процесса с донным кислородным дутьем при повышенной доле лома в шихте, создаются конструкции горизонтальных машин непрерывного литья заготовок и технология разливки на них, ведутся другие крупные исследования.

Практически на каждом большом металлургическом предприятии работали или имеются опытно-промышленные установки. Так, на комбинате "Запорожсталь" эксплуатировалась опытная шахтная печь по металлизации окатышей, в марганцовском цехе был сооружен крупный сталеплавильный агрегат непрерывного действия производительностью 30...40 т/ч, на Днепровском меткомбинате им.Дзержинского проводились исследования на секториальной модели /в натуральную величину/ горна доменной печи.

В отличие от промышленных, на опытно-промышленные агрегаты либо совсем не устанавливают план выпуска готовой продукции, либо значительно уменьшают плановые задания, которые составляют с учетом экспериментального характера этих установок. Объем работы на них определяется программой исследований. Для выполнения последней выделяются материальные и трудовые ресурсы /сырье, сменное оборудование, штат обслуживающего персонала и др./.

Особенностью исследований в опытно-промышленных условиях является то, что они ведутся комплексно. Большое внимание уделяется контролю качества готовой продукции, технологического процесса, вопросам экономики и организации труда. Результаты полупромышленных исследований относительно быстро внедряются в производство. Если опытно-промышленный агрегат был сооружен на заводе, то часто после выполнения программы исследований и освоения агрегата для него могут устанавливать плановые задания и переводить его на работу в промышленном режиме.

§ 3. Особенности проведения промышленных экспериментов

Значительная часть исследований металлургических процессов проводится в промышленных условиях – на агрегатах и установках, действующих в доменных, сталеплавильных и электросталеплавильных цехах, на агло-

фабриках. В ходе этих исследований отрабатывают новые технологические процессы и конструкции оборудования; осваивают и внедряют новые технологические приемы, системы контроля и средства автоматизации существующих процессов; совершенствуют технологические процессы, методы их контроля и управления, конструкции агрегатов и оборудования.

Важнейшая особенность промышленных исследований заключается в том, что они ведутся параллельно с выполнением на действующих агрегатах плановых заданий по выпуску продукции. Резервы производственных мощностей, которые позволили бы использовать время и материальные средства для проведения исследовательской работы, в большинстве случаев отсутствуют, в связи с чем намечаемые мероприятия не должны вызывать простоев, снижения производительности оборудования и ухудшения качества продукции.

Второй особенностью является сложность создания удовлетворительной методики исследований современных металлургических процессов в промышленных условиях. Это, как указано в [16], связано с трудностью выявления специфической роли того или иного фактора, характеризующего технологию, затушевыванием этой роли другими, иногда еще труднее поддающимися учету факторами.

Для промышленных агрегатов и технологических процессов конечный результат определяется действием множества взаимосвязанных факторов. Очень сложно зафиксировать на постоянном уровне все факторы, кроме того, который представляет интерес в данный момент. Это не означает, что невозможно проводить исследования в условиях производства, но методы работы исследователя и обработки данных в промышленных и лабораторных условиях существенно различаются. Последнее, в частности, объясняется тем, что применяемые на производстве средства контроля менее точны, чем используемые в лабораторном эксперименте.

Тематика промышленных исследований определяется насущными требованиями производства и перспективами его развития. Часть исследований направлена на улучшение качества продукции на всех стадиях технологического цикла, налаживание выпуска новых материалов и изделий, повышение производительности и других технико-экономических показателей агрегатов.

Промышленные исследования проводятся на установленных в металлургических цехах агрегатах /доменных и ферросплавных печах, кислородных конвертерах, марганцовских, двухвальных и электросталеплавильных печах/ и разливочном оборудовании. Основной метод исследований в промышленных условиях – проведение технологических процессов в опытных режимах.

разработанных на основании литературных данных, георетического анализа, лабораторных или опытно-промышленных экспериментов. Элементами опытной технологии могут быть: новые тепловые, температурные и дутьевые режимы; виды сырья, огнеупоров, топлива, технологических присадок; усовершенствованные конструкции отдельных узлов агрегатов и др. Для контроля за процессом используются имеющиеся в цехе контрольно-измерительные средства, в ряде случаев - дополнительно устанавливаемые или переносные приборы. Необходимые анализы выполняют в заводских лабораториях и частично - в лабораториях исследовательских институтов.

Первоначально проводят единичные опыты на отдельном агрегате, в ходе которых опробывают различные изменения технологических режимов. Лучшие варианты проверяют в небольших сериях опытов, выполняемых на одном агрегате в течение нескольких суток, иногда - недель. Результаты сравнивают с производственными данными, полученными на этом же агрегате до и после опытов. Таким образом, можно исключить влияние ряда не поддающихся учету факторов и оценить достоинства и недостатки того или иного варианта технологии.

Если установлены определенные преимущества опытной технологии перед существующей, то один из агрегатов цеха на некоторое время переводят на работу по новой технологии. В дальнейшем при получении положительных результатов вносят дополнения или изменения в действующую технологическую инструкцию и все оборудование цеха переводят на работу по усовершенствованной технологии.

Учитывая, что при проведении промышленного эксперимента снижение производительности оборудования и качества продукции недопустимо, информацию о ходе и результатах процесса получают путем хронометражи, контроля показателей с помощью имеющихся в цехе приборов, отбора проб металла, шлака и газа, измерений температуры.

Хронометраж проводят для точного определения продолжительности технологических операций, в частности, таких, которые не фиксируются в цеховой документации. Одновременно регистрируют количество и порядок ввода различных материалов, результаты визуальных наблюдений за ходом процесса, показания контрольно-измерительных приборов, порядок отбора проб и данные их анализа, измерения температуры и др. Пробы отбирают по принятой в цехе технологии, иногда с этой целью агрегаты оборудуют специальными приспособлениями, не нарушающими технологический процесс. Методы отбора проб и конструкции пробоотборников очень разнообразны и зависят от решаемых задач.

При разработке методики и организации исследований в цеховых условиях особое внимание следует уделить технике безопасности. Часто приходится работать с жидким металлом и шлаком, горючими газами, токсичными средами, при высоких давлениях газов и жидкостей, в помещениях, оборудованных подъемно-транспортными машинами, т.е. в условиях повышенной опасности. Поэтому исследовательский персонал должен быть знаком с правилами техники безопасности и обеспечен необходимой спецодеждой.

Перед проведением промышленных исследований в соответствии с календарным планом НИР составляют текущий план-график, который после утверждения руководством цеха становится официальным документом, разрешающим проведение исследования.

§ 4. Основы теории метрологии

Метрология – наука об измерениях, методах достижения их единства и требуемой точности. К основным проблемам метрологии относятся: создание общей теории измерений; образование единиц физических величин и систем единиц; разработка методов и средств измерений, методов определения их точности, основ обеспечения единства и единобразия средств измерений; создание эталонов и образцовых средств измерений, проверка мер и средств измерений.

В России в 1893 г. по инициативе Д.И.Менделеева была создана Главная палата мер и весов, которая преобразована во Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им.Д.И.Менделеева /ВНИИМ/. В 1960 г. международными метрологическими организациями разработана Международная система единиц /СИ/, которая была принята II Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. Основные единицы СИ приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1

Наименование величины	Единица	Сокращенное обозначение	Размер единицы
Длина	метр	м	/I м/
Масса	килограмм	кг	/I кг/
Время	секунда	с	/I с/
Сила электрического тока	ампер	А	/I А/
Температура	kelвин	К	/I К/
Сила света	кандела	кд	/I кд/
Количество вещества	моль	МОЛЬ	/I МОЛЬ/

Производные единицы СИ образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или определений соответствующих величин. Так, плотностью называется масса единичного объема вещества. Отсюда единица плотности – килограмм на кубический метр $\text{кг}/\text{м}^3$. Единица силы в СИ – ньютон – вводится на основании второго закона Ньютона, устанавливающего соотношение между силой, массой и ускорением. Отсюда единица силы – килограмм-метр на секунду в квадрате $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{s}^2$. Аналогично выводятся остальные производные величины.

При проведении исследований сведения о ходе процессов и состоянии агрегата или установки получают путем измерений. Измерением называется нахождение с помощью технических средств значений некоторой физической величины. Измеряемая величина сравнивается с единицей этой величины, результат умножения которой на отвлеченное число является найденным значением физической величины и служит количественной информацией об исследуемом объекте.

В металлургических исследованиях определяемые величины чаще всего измеряют с помощью различных электрических средств. Они обеспечивают возможность получения необходимых данных на расстоянии, в малодоступных местах; дистанционную передачу информации; использование автоматизированных систем управления технологическими процессами /АСУ ТП/; обладают высокой чувствительностью аппарата, малой инерционностью, широким диапазоном измерений и другими преимуществами. Объектом измерения является сложный процесс, параметры которого в реальных условиях обычно взаимосвязаны. Из всего многообразия физических величин, характеризующих его, выбирается отдельный параметр, который называется измеряемой величиной.

Измерительный прибор включает в себя три основных узла, которые могут размещаться отдельно друг от друга и соединяться кабелем:

1/ датчик, который размещается непосредственно на объекте измерения. Датчики могут быть контактные /соприкасающиеся с измеряемым объектом/ и бесконтактные. При длительной эксплуатации в условиях агрессивных сред и высоких температур более надежны бесконтактные датчики, однако во многих случаях они дают большие погрешности, что ограничивает их применение;

2/ измерительное устройство, которое может быть конструктивно обособлено и размещается на некотором расстоянии от измеряемого объекта;

3/ указатель информации или результата измерения; монтируется вместе с измерительным устройством или размещается отдельно от него в месте, отведенном для контроля за процессом.

Основными характеристиками прибора являются чувствительность и точность. Чувствительность – размерная величина, равная приращению измеряемого параметра, вызывающему изменение показаний прибора. Точность – характеристика качества измерений, отражающая близость к нулю погрешностей их результатов.

Погрешность измерения – характеристика его результата, представляющая собой отклонение найденного значения величины от ее истинного значения. Различают погрешность абсолютную, выраженную в единицах измеряемой величины, и относительную, представляющую собой отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины /в долях единицы, процентах, промилле и т.п./:

$$\delta = \frac{(a - \bar{a})}{\bar{a}},$$

где δ – относительная погрешность измерения; a, \bar{a} – соответственно найденное и истинное значение измеряемой величины.

Проявления погрешностей измерений и приборов чрезвычайно разнообразна, что вызывает необходимость классифицировать их по ряду признаков.

Инструментальные погрешности связаны с несовершенством измерительных приборов и, в первую очередь, датчиков. Они возникают при плохой наладке приборов или неудовлетворительном уходе за ними.

Методические погрешности обусловлены недостатками метода измерения. Их возникновение объясняется тем, что измеряют не нужную величину, а комплекс величин, куда входит и измеряемый параметр /обычно в качестве основной составляющей/, или величину, которая приблизительно отражает нужный параметр. Чаще всего это делают, чтобы упростить измерения.

Систематические погрешности – ошибки, которые не изменяются во времени. Они возникают из-за неточности градуировки, сдвига нуля прибора или смешения датчика, а также из-за постоянного отклонения от нормальных условий эксплуатации средств измерений. Систематическую ошибку трудно обнаружить, и поэтому при повторных опытах ошибка повторяется. Систематические погрешности могут быть полностью устранены введением соответствующих поправок /корректировки нуля прибора, условий проведения эксперимента и др./.

Прогрессирующие погрешности медленно изменяются с течением времени и обусловлены старением аппаратуры, приборов, изменением свойств датчиков в ходе эксплуатации. Прогрессирующие погрешности могут быть скорректированы введением поправки лишь на данный момент времени в от-

личие от систематических, которые можно скорректировать один раз на все время работы системы. Поэтому поправки на прогрессирующие погрешности требуется вводить периодически и при том тем чаще, чем важнее исключить их влияние.

Случайными называются неопределенные по величине или недостаточно изученные погрешности, в появлении которых не удается установить какой-либо закономерности. Случайные погрешности проявляются в виде некоторого разброса данных при повторении аналогичных опытов. В подавляющем большинстве они подчиняются нормальному закону распределения, вероятность их появления и величина могут быть определены с помощью теории вероятностей и влияние на результат эксперимента может быть учтено с помощью математических методов обработки результатов. Составляющие погрешности реальных измерительных систем проявляются в основном как случайные. Разделение погрешностей на систематические, прогрессирующие и случайные – лишь удобный прием их анализа. Погрешности, обусловленные одними и теми же факторами, в одной серии экспериментов могут быть систематическими, а в другой – случайными.

Погрешности измерений приводят к тому, что в ходе каждого опыта получают не истинный результат, а некоторый приближенный к нему. Иными словами, физическую величину измеряют с ограниченной степенью точности, зависящей от суммарной погрешности. Чем выше точность измерения, тем ближе к истинному значению измеряемая величина.

Точность измерений обусловлена измерительным прибором и условиями измерения. Метрологической характеристикой прибора является класс точности, который характеризует предельно допустимую погрешность измерения. Она обычно выражается в процентах диапазона измерения данного прибора. Поэтому чем больше диапазон шкалы прибора, тем выше абсолютная погрешность при одном и том же классе точности. Следовательно, для уменьшения погрешности измерений необходимо использовать приборы в соответствии с уровнем измеряемых величин.

Погрешности в различных элементах измерительных систем устанавливаются при многократной проверке прибора и представляют собой разброс точек относительно какой-то средней. Характеристики однотипных приборов и датчиков, выпускаемых серийно, имеют индивидуальные особенности. Поэтому для повышения точности измерений в лабораторных условиях желательно проверить градуировку датчиков и измерительных приборов, сравнив их показания с показаниями соответствующих эталонных приборов или приборов более высокого класса точности. Это важно при выборе методики исследования, так как повышение точности эквивалентно увеличению коли-

чества проводимых экспериментов. В то же время следует учитывать, что для повышения точности необходимо усложнять измерительные системы, а это может привести к снижению их надежности. В ряде случаев целесообразнее провести больше опытов, используя менее точную, но более простую аппаратуру, чем применять высокоточные системы.

§ 5. Измерительная аппаратура. Средства измерения

Необходимое условие проведения эксперимента – контроль его параметров с помощью различных технических средств. Выбор средств контроля обусловлен природой измеряемой физической величины, диапазоном ее изменений, требуемой точностью измерения, условиями проведения эксперимента.

В металлургических исследованиях наиболее часто измеряют температуру различных сред /газов, расплавленных металла и шлака и т.д./, давление и расходы газообразных и жидких реагентов, скорости газовых потоков, механические перемещения рабочих тел, анализируют составы реагирующих фаз /газа, металла, шлака/.

Измерения температуры. Теоретическое определение температуры основано на втором начале термодинамики как производной от энергии тела по его энтропии. Непосредственное измерение температуры невозможно. Существующие методы основаны на однозначной взаимосвязи температуры и другой физической величины, которая может быть измерена непосредственно /объем, давление, ЭДС, сопротивление и др./. Единица абсолютной температуры в СИ – кельвин /К/, допускается применять градус Цельсия /°C/.

Для измерения температуры применяются термометры расширения, сопротивления. В области высоких температур /более 1000 К/ используют термоэлектрические термометры /термопары/ и пирометры излучения.

Платиновая термопара имеет наиболее стабильную характеристику и считается эталонной. Она может длительно работать при температурах до 1300 °C и кратковременно – при температурах до 1600 °C. Термопары на основе сплавов платины с родием пригодны для измерения температуры до 1800 °C. Стабильную характеристику имеют вольфрамовые термопары, которыми можно пользоваться в области температур до 2000 °C. Для низкотемпературных измерений предназначены хромель-копелевые /до 600 °C/ и хромель-алимелевые /до 1300 °C/ термопары, которые используются в комплексе с измерительными приборами, наиболее простыми из которых являются милливольтметры. Обычно применяются электронные /ЭПИ, ПСР, КСП и др./ или переносные /ПШ-63 и др./ потенциометры.

Для бесконтактного измерения температуры служат пирометры: оптические /ЭОП, ОП/, фотоэлектрические /ФЭП-3, ФЭП-4/, радиационные /ТЭРА-50/, цветовые /ЦЭП-ЗМ, ЦЭП-4/. Недостаток этого метода состоит в том, что показания прибора зависят от прозрачности среды, через которую производится измерение, степени черноты поверхности, наличия шлаковых пленок на поверхности металла и т.д.

Измерение давления и разряжения. Единица давления в СИ – паскаль /Па/, равный давлению силы в 1 Н на 1 м^2 . Для измерения избыточного давления используют манометры. Разность давлений измеряется дифференциальными манометрами. Для измерения разряжения служат вакуумметры. По принципу действия различают приборы жидкостные, пружинные, электрические и др. В лабораторных исследованиях часто используются наиболее простые жидкостные, а на производстве – в основном пружинные манометры.

Для измерения давления кислорода применяются приборы специального исполнения. На циферблате такого прибора нанесена надпись "Кислород" и "Маслоопасно". При постоянном давлении верхний предел шкалы манометра должен быть в 1,33 раза больше рабочего давления, а при переменном давлении – не менее чем в 1,5 раза.

Для измерения небольших избыточных давлений и разряжений применяют напоромеры и тягометры.

Технические показывающие приборы могут быть снабжены дополнительными устройствами для сигнализации и дистанционной передачи аналогового электрического сигнала. Большое распространение получили комплексы измерительных приборов со средствами контроля, регулирования и управления.

Измерения расходов. Расход – это перенос вещества потоком в единицу времени. Различают массовый (кг/с; моль/с) и объемный ($\text{м}^3/\text{с}$) расходы вещества. Для измерения расхода применяют два типа приборов – счетчики, суммирующие количество вещества, прошедшего через измерительный участок за определенный промежуток времени, и расходомеры, определяющие количество вещества, проходящего через измерительный участок в единицу времени /с, ч/. В лабораторном и промышленном эксперименте наиболее часто используются расходомеры.

Существует более 20 методов измерения расхода; из них наиболее распространены по перепаду давления, электромагнитные и тахометрические.

Анализ состава реагирующих фаз. Приборы, предназначенные для определения состава газовых смесей, называются газоанализаторами. В металлургическом эксперименте наиболее часто приходится определять содержание в газах таких веществ, как O_2 , N_2 , CO и CO_2 , H_2 и H_2O .

Химические газоанализаторы /в основном неавтоматические/ работают по принципу поглощения /или сжигания/ отдельных компонентов газовых смесей. Их недостатки – периодичность действия и длительное время анализа /до 40 мин/.

Магнитные газоанализаторы применяются для измерения содержания кислорода в газовых смесях /МН 5130, МН 5130 М/. Они основаны на отличии от других газов магнитной восприимчивости кислорода.

Оптические и оптико-акустические газоанализаторы используют для измерения содержания многоатомных газов / CO , CO_2 , CH_4 / в сложных газовых смесях /например, ОА-2109, ОА-2209, ОА-2309, ОА-0306Т, ОА-0307/. Работа этих газоанализаторов основана на изменении степени поглощения лучистой энергии в инфракрасной области спектра.

Наиболее распространены в лабораторной практике хроматографы. Их действие основано на разделении газовой смеси путем адсорбции или растворения в жидкости. Концентрации адсорбированных компонентов с помощью детектора определяются автоматически и записываются на приборе.

В промышленности для контроля и в исследованиях применяют массспектрометры, которые незаменимы при определении химического и изотопного состава вещества и сложных многокомпонентных смесей. Они обеспечивают высокую точность и скорость анализа.

На результаты газового анализа большое влияние оказывают место отбора пробы, правильная отладка вспомогательного оборудования – газозаборного устройства, фильтров, холодильников и т.д.

Анализ шлака и металла проводится химическим или спектральным методом. Большое влияние на результаты анализа оказывают методика отбора проб и их подготовка к анализу.

§ 6. Применение ЭВМ в научных исследованиях

Использование вычислительной техники значительно повышает производительность труда исследователя, обеспечивает высокую точность обработки экспериментальных данных, их количественное описание математическими моделями, позволяет глубже анализировать и обобщать данные опытов. ЭВМ используют для автоматизации исследований и обработки результатов наблюдений. В этом случае ЭВМ непосредственно включена в состав экспериментальной установки. Результаты наблюдений вводятся в вычислительную машину без участия исследователя, что очень важно при высокой скорости процессов и большом объеме информации. Такие системы обеспечивают сбор первичного материала, предварительную обработку данных, хранение сведений во время эксперимента, контроль за ходом опыта,

централизованное отображение информации, окончательную обработку и выдачу результатов. Дальнейшая автоматизация научных исследований заключается в использовании ЭВМ для сравнения новых результатов со старыми и проверки гипотез.

Применение ЭВМ для обработки результатов эксперимента получило широкое распространение, в частности, потому, что большинство задач, возникающих в процессе исследований при постановке и реализации математических моделей, решается численными методами. В общем случае для решения задачи необходимо составить программу расчета и ввести в ЭВМ исходные данные. Для составления программы необходимо знать машинный язык и иметь определенные навыки. Более простой путь - обращение к библиотекам программ. Современные цифровые ЭВМ имеют большие библиотеки, содержащие программы, предназначенные для многократного применения, которые используют при решении часто встречающихся задач - нахождения корней уравнения высоких степеней, численного интегрирования, решения дифференциальных уравнений и систем уравнений, обработка экспериментальных данных методами наименьших квадратов, регрессионного и корреляционного анализа и др.

Рассмотрим пример использования ЭВМ для описания массива экспериментальных данных уравнением регрессии. Задача решается в два этапа: выбор типа функциональной зависимости /идентификация данных/ и определение коэффициентов зависимости /задача оценивания/. Идентификация при неизвестном виде связи между членами массива осуществляется последовательным расчетом и нахождением коэффициента корреляции по ряду /10-20/ принятых априори функций. Предварительно выравниваются данные в соответствии с видом каждой применяемой при обработке зависимости. Алгоритм выбора эмпирической связи реализуется по максимальному значению коэффициента корреляции. Таким образом, подбирается вид зависимости, наилучше аппроксимирующей экспериментальные данные. В заключение определяются коэффициенты регрессии, их дисперсия, доверительный интервал и проверяется адекватность модели.

Для научных и инженерных расчетов широко используются микрокалькуляторы. Программируемые микрокалькуляторы серии "Электроника" БЭ-34, МК-54, МК-56 и последние выпуски МК-52 и МК-61 имеют объем программной памяти 98 /105/* шагов и 14 /15/ адресуемых регистров памяти. Это обеспечивает успешное решение достаточно сложных задач при наличии навыков программирования. Для перечисленных микрокалькуляторов

* В скобках - для МК-61 и МК-52.

имеется достаточное программное обеспечение, содержащее решение уравнений, в том числе дифференциальных, численное дифференцирование и интегрирование, вычисление специальных функций, статистические расчеты и т.д. Библиотеки прикладных программ есть в справочной литературе.

Контрольные вопросы

1. Основные задачи эксперимента в черной металлургии.
2. В чем заключается универсальность и ограниченность результатов лабораторного эксперимента?
3. Какие основные задачи решаются на стадии опытно-промышленных исследований?
4. В чем сложность проведения промышленного эксперимента?
5. Основные единицы в СИ.
6. Дайте характеристику погрешностей измерений.
7. Чем обоснован выбор метода измерений и используемых приборов?
8. Основные пути использования ЭВМ в научных исследованиях.

Глава 5. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

§ I. Элементы теории вероятностей

В большинстве научных и технических задач используются методы анализа, основанные на теории вероятностей. В данной работе нет строгого изложения теории вероятностей, а рассматриваются только отдельные элементы, необходимые для пояснения методов обработки результатов эксперимента.

Вероятность события $A - P_{(A)}$ есть отношение числа случаев n , в которых это событие осуществляется, к общему числу N всех элементарных равновозможных случаев. Вероятность представляет собой правильную дробь и может изменяться от нуля до единицы. Если событие A реализуется во всех испытаниях, оно достоверно и его вероятность равна единице. Если событие A невозможно в условиях данного испытания, оно называется невозможным и его вероятность равна нулю.

Два или несколько событий называются взаимно несовместными или исключающими друг друга, если никакие из них не могут осуществляться совместно. Так, при бросании кубика с нанесенными на гранях числами от 1 до 6 может выпасть только одно какое-то число с вероятностью 1/6.

Правило сложения вероятностей заключается в том, что если событие может осуществляться различными взаимно несовместимыми способами, то вероятность этого события равна сумме частных вероятностей каждого способа его осуществления.

Правило умножения вероятностей. Если событие предполагает осуществление двух событий A и B , то его вероятность равна произведению вероятности A на вероятность B , когда известно, что событие A уже произошло.

Если событие A не влияет на вероятность осуществления события B , то такие события называются независимыми. В качестве последних можно рассматривать бросание двух кубиков. Вероятность получения двух заданных чисел, например, двух единиц, равна произведению $1/6 \cdot 1/6$. Другим примером может служить извлечение шаров из урны. Пусть в урне находятся шары белого и черного цвета. Если первый раз из урны взяли шар белого цвета, то при следующем извлечении вероятность взять белый шар уменьшается, а черный – возрастает.

При проведении серии испытаний получают результат, который принимает ряд значений. Эта величина /результат испытаний/ называется случайной.

Так, при выплавке в марганцовской печи 220 плавок стали марки 30ХГСА содержание углерода в металле изменялось от 0,26 до 0,35%. В табл.5.1 приведено распределение плавок с различным содержанием углерода в общем массиве.

Таблица 5.1

Показатель	С, %										Всего
	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	
Количество плавок	2	7	12	35	39	53	35	18	18	I	220
Частота случаев, %	0,91	3,2	5,45	15,91	17,73	24,10	15,91	8,18	8,18	0,45	100

Дискретную случайную величину представляют в виде таблицы, где каждому значению x соответствуют вероятности P_x , с которыми она принимает эти значения. В условиях реального эксперимента количество испытаний ограничено и распределение случайной величины характеризуют частотой случаев, которая отличается от вероятности.

Согласно теореме Бернулли при неограниченном увеличении числа одинаковых и независимых друг от друга опытов с практической достоверностью можно утверждать, что частота событий будет сколь угодно мало отличаться от вероятности этого события.

Функция распределения вероятностей случайной величины $F(x)$ – это вероятность того, что значение случайной величины x меньше произвольного /неслучайного/ вещественного числа x . Её также называют функцией накопленных вероятностей. Очевидно, что это неубывающая функция, которая изменяется в пределах $F(-\infty) = 0$ и $F(+\infty) = 1$. На основании правила сложения вероятностей можно утверждать, что вероятность попадания случайной величины в заданный участок x_1, x_2 , равна приращению функции распределения на этом участке /рис.5.1, а/. Для дискретной случайной величины $F(x)$ представляет собой ступенчатую функцию /рис.5.1, б/, принимающую конечное счетное множество значений в интервале $0 \dots 1,0$.

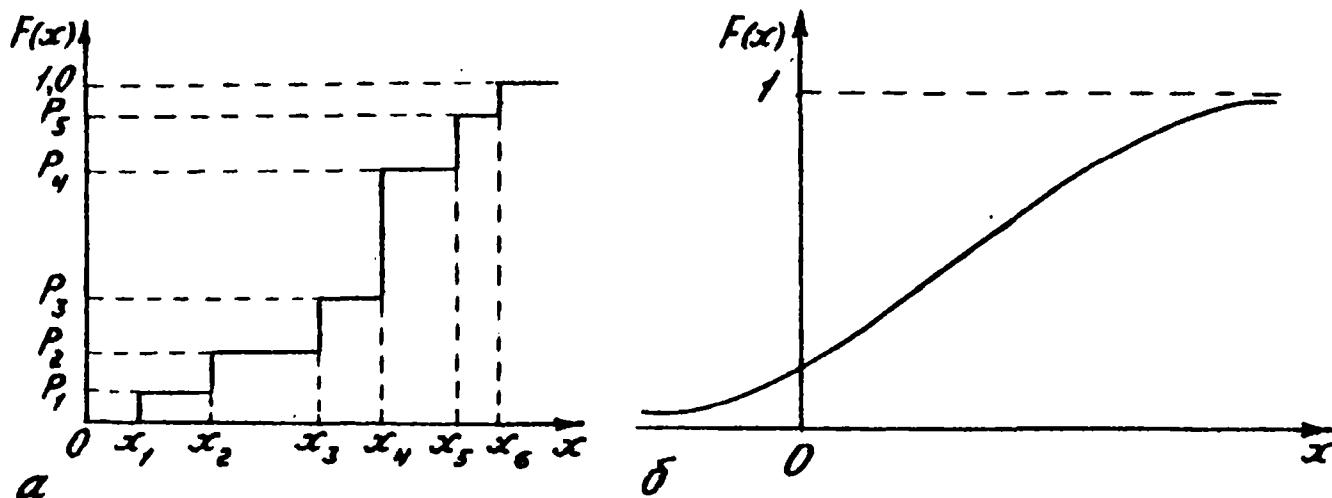


Рис.5.1. График функции распределения вероятностей случайной величины: а – дискретной; б – непрерывной

Ступенчатый вид функции $F(x)$ получают при ограниченном количестве испытаний как дискретной, так и непрерывной случайной величины. Понятно, что если физическая случайная величина непрерывна по своей природе, то неограниченное увеличение числа испытаний превращает ступенчатую функцию в плавную кривую.

Если функция распределения вероятностей дифференцируема, производная $dF(x)/dx = p(x)$ называется плотностью распределения вероят-

ности /рис.5.2/. Величина $P(x)$ позволяет определить вероятность события на любом конечном участке ab изменения случайной величины:

$$P(a < x < b) = \int_a^b P(x) dx, \quad 15.1/$$

г.е. равна площади под кривой $y = P(x)$, построенной на данном интервале ab

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(x) dx = 1. \quad 15.2/$$

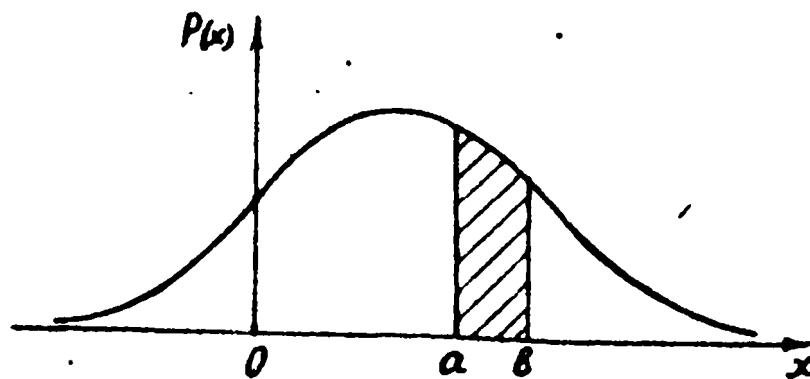


Рис.5.2. Плотность распределения вероятности случайной величины

§ 2. Математическое ожидание и дисперсия

Функция распределения вероятностей дает полное представление об изучаемой случайной величине. Однако на практике в ряде случаев удобнее использовать такие численные характеристики распределений, как среднее значение, разброс и др.

Математическим ожиданием случайной величины $M(X)$ называется теоретическое среднее значение:

для дискретной величины

$$M(X) = \sum_{i=1}^{\infty} (x_i P_i); \quad 15.3/$$

для непрерывной величины

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x P(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x dF(x). \quad 15.4/$$

Математическое ожидание отличается от эмпирического среднего значения случайной величины, так как последнее определяется не на основе вероятности событий, а на основе частностей и содержит ошибку эксперимента.

Эмпирическое среднее является приближенной оценкой величины $M(X)$, точность которой возрастает с увеличением числа опытов, в которых определялась случайная величина, и точности измерений.

Математическое ожидание обладает следующими свойствами.

1. Математическое ожидание постоянной величины A равно этой постоянной:

$$M(A) = A. \quad /5.5/$$

2. Математическое ожидание суммы случайных величин равно сумме их математических ожиданий:

$$M(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \sum_{k=1}^n M(X_k). \quad /5.6/$$

3. Постоянный множитель случайной величины C можно выносить за знак математического ожидания:

$$M(CX) = CM(X). \quad /5.7/$$

4. Математическое ожидание произведения независимых случайных величин X и Y равно произведению их математических ожиданий:

$$M(XY) = M(X)M(Y). \quad /5.8/$$

Свойства математического ожидания используются при операциях со средними значениями случайной величины.

Рассеивание случайной величины около ее математического ожидания характеризуется дисперсией, которая обозначается $D(X)$ или σ^2 :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad /5.9/$$

Свойства дисперсии:

1/ дисперсия постоянной C равна нулю:

$$D(C) = 0; \quad /5.10/$$

дисперсия суммы двух независимых случайных величин X и Y равна произведению дисперсий этих величин:

$$D(X+Y) = D(X)D(Y); \quad /5.11/$$

3/ дисперсия произведения случайной величины на постоянный множитель равна произведению дисперсии на квадрат постоянной:

$$D(CX) = C^2 D(X). \quad /5.12/$$

Квадратный корень из дисперсии называется стандартным отклонением или среднеквадратичным отклонением и обозначается σ :

$$\sigma = \sqrt{D(x)}. \quad /5.13/$$

Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение имеют размерность случайной величины. Размерность дисперсии равна размерности квадрата случайной величины.

Для массива данных (см. табл. 5.1) дисперсия может быть рассчитана по уравнению

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 m,$$

где n - количество данных в массиве; m - частота случаев:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{220} (2(0,26 - 0,31)^2 + 7(0,27 - 0,31)^2 + 12(0,28 - 0,31)^2 + \\ &+ 35(0,29 - 0,31)^2 + 39(0,30 - 0,31)^2 + 53(0,31 - 0,31)^2 + \\ &+ 35(0,32 - 0,31)^2 + 18(0,33 - 0,31)^2 + 18(0,34 - 0,31)^2 + \\ &+ 1(0,35 - 0,31)^2) = 3,276 \cdot 10^{-4}; \end{aligned}$$

$$\sigma = 1,81 \cdot 10^{-2} \%$$

или по более удобному для вычислений выражению

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 m}{\sum m} - \bar{x}^2 = \frac{1}{n} \left(\sum m x_i^2 - n \bar{x}^2 \right). \quad /5.14/$$

При ручном счете используют свойства среднего и дисперсии, принимая за условный нуль величину, близкую к средней, и пересчитывая все значения по уравнению $x' = \frac{x - a}{\sigma}$, где a - условное начало отсчета; σ - величина интервала. При этом

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sigma^2 \sigma'^2; \quad \bar{x}' = \frac{\sum x'_i m}{\sum m}; \\ \sigma'^2 &= \frac{\sum x'^2 m}{\sum m} - \left(\frac{\sum x'_i m}{\sum m} \right)^2; \quad \sigma^2 = \sigma^2 \left(\frac{\sum x'^2 m}{\sum m} - \bar{x}'^2 \right). \end{aligned}$$

Пример вычисления по этой схеме для массива данных, содержащихся в табл. 5.1, приведен в табл. 5.2.

Среднее значение

$$\bar{x}' = - \frac{54}{220} \cdot 0,01 + 0,31 = 0,3075\%.$$

Таблица 5.2

Содержание углерода в металле $x_i, \%$	Количество плавок n	Отклонения от условно-го начала $(x-\bar{x})$ $\sigma = 0,31$	Условный вариант $\frac{x-\bar{x}}{\sigma} = x'$ $\sigma = 0,01$	mx'	x'^2	mx'^2
0,26	2	-0,05	-5	-10	25	50
0,27	7	-0,04	-4	-28	16	112
0,28	12	-0,03	-3	-36	9	108
0,29	35	-0,02	-2	-70	4	140
0,30	39	-0,01	-1	-39	1	39
0,31	53	0	0	0	0	0
0,32	35	0,01	1	35	1	35
0,33	18	0,02	2	36	4	72
0,34	18	0,03	3	54	9	162
0,35	1	0,04	4	4	16	16
Всего	$n = 220$	-	-	-54	734	

Дисперсия

$$\sigma^2 = 0,01^2 \left[\frac{734}{220} - \frac{54^2}{220} \right] = 3,28 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma = 1,81 \cdot 10^{-2}.$$

Если дисперсия рассчитывается по небольшому массиву данных / $n < 50$ /, то в расчет следует вводить поправку на число связей в выборке [см. уравнение /5.9/].

При использовании микрокалькуляторов уравнения для расчетов среднего и дисперсии программируются достаточно просто.

Относительная характеристика рассеивания представляет собой отношение среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию случайной величины, которое называют коэффициентом вариации:

$$\gamma = \sigma / \bar{x}. \quad /5.15/$$

В качестве других числовых характеристик случайной величины используют медиану и моду. Медиана – это значение, отвечающее середине интервала, упорядоченного по величине ряда случайной величины; мода – значение переменной, соответствующее максимальной плотности вероятности непрерывной случайной величины или максимальной вероятности распределения дискретной величины.

§ 3. Основные законы распределения случайной величины

Равномерное распределение. Случайную величину называют равномерно распределенной, если в пределах интервала (α, β) ее значений плотность вероятности остается неизменной, а вне этого интервала равна нулю /рис.5.3/:

$$P(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < \alpha \text{ и } x > \beta; \\ \frac{1}{\beta - \alpha} & \text{при } \alpha \leq x \leq \beta; \end{cases}$$

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < \alpha; \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \text{при } \alpha \leq x \leq \beta; \\ 1 & \text{при } x > \beta; \end{cases}$$

$$M(X) = \frac{\alpha + \beta}{2}; \quad D(X) = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12}. \quad /5.16/$$

Показательное распределение /рис.5.4/

$$P(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0; \\ \alpha e^{-\alpha x} & \text{при } x > 0; \end{cases}$$

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0; \\ 1 - e^{-\alpha x} & \text{при } x > 0; \end{cases} \quad /5.17/$$

$$M(X) = \frac{1}{\alpha}; \quad D(X) = \frac{1}{\alpha^2}.$$

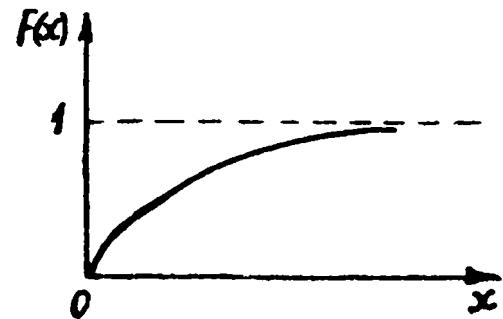
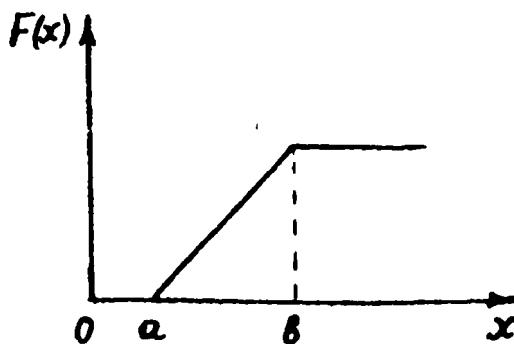
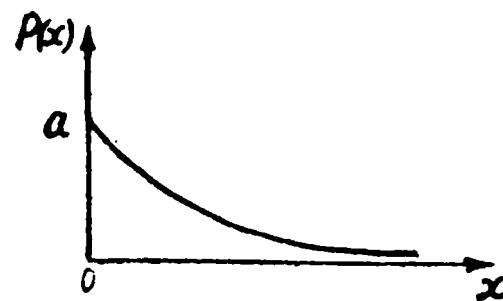
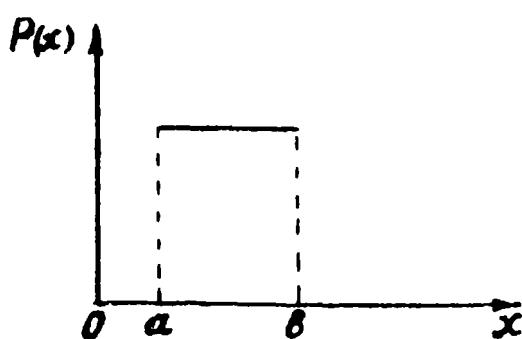


Рис.5.3. Равномерное распределение Рис.5.4. Показательное распределение

Нормальное распределение. Если случайная величина представлена суммой большого числа слагаемых, вклад каждого из которых одинаково мал, то эта сумма оказывается распределенной по нормальному закону или по закону Гаусса /рис.5.5/. Нормальный закон распределения наиболее часто применяется в математической статистике. Примерами нормально распределенных величин в металлургической практике могут служить часовая производительность металлургических агрегатов, химический состав, свойства стали в диапазоне, предусмотренном Государственным стандартом для данной марки, и др.

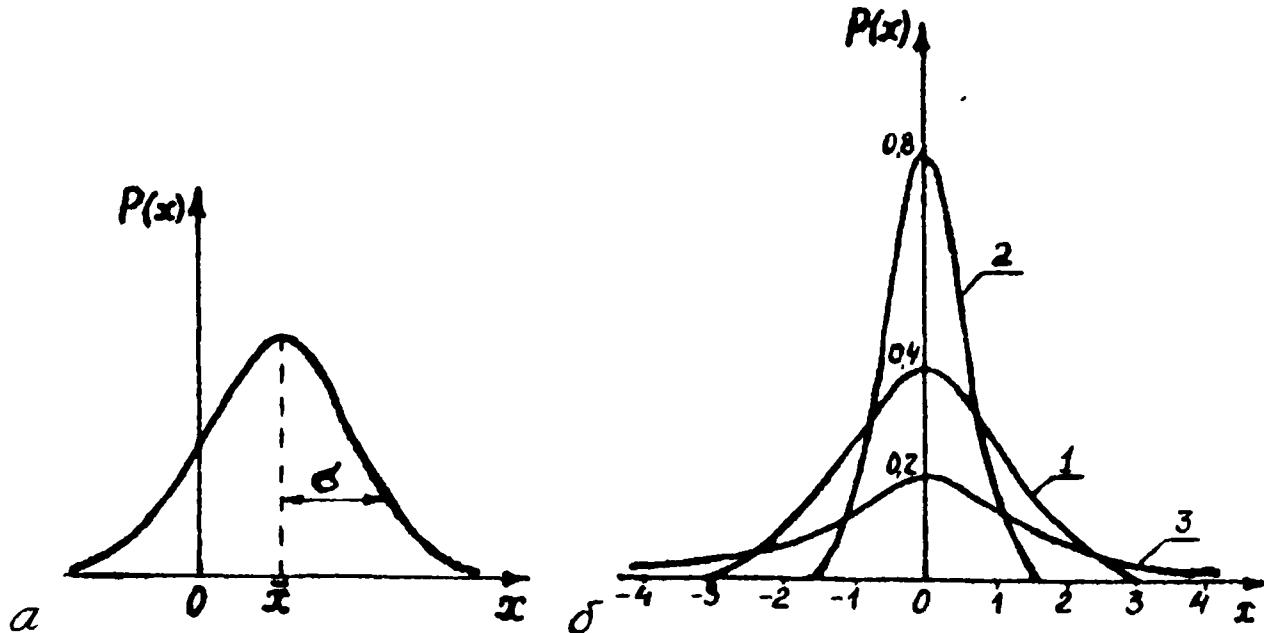


Рис.5.5. Нормальное распределение: а - с отличным от нуля средним значением \bar{x} ; б - со средним значением $\bar{x} = 0$; 1 - нормированное распределение $\sigma = 1$; 2 - $\sigma = 0,5$; 3 - $\sigma = 0,2$

Нормальное распределение

$$P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right);$$

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) dx; \quad 15.18/$$

$$M(X) = \bar{x}; \quad D(X) = \sigma^2.$$

Обычно пользуются нормированным нормальным распределением, для которого в табл.П.I.1., П.I.2 приведены значения плотности вероятности и интегральной функции. Нормирование заключается в том, что вместо

случайной величины x используется величина отклонения x от его среднего значения, отнесенная к стандартному отклонению: $y = (x - \bar{x})/\sigma$. Эта новая переменная y будет распределена по нормальному закону при $\bar{x} = 0$ и $\sigma = 1$. Тогда для нормированного отклонения

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2};$$

5.19/

$$F(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-u^2/2} du.$$

Нормированное нормальное распределение симметрично относительно нуля. Основным параметром является среднеквадратичное отклонение. По табл. П.1.1 легко определить вероятность, с которой случайная величина, распределенная по нормальному закону, находится в заданных границах. Например, вероятность того, что случайная величина находится в интервале $(x \pm \sigma)$, составляет 0,6825, а в интервале $(x \pm 3\sigma)$ - 0,9973.

Кроме отмеченных, существует ряд других законов распределения: распределение Бернулли /биномиальное распределение/, распределение Пуассона, логарифмически нормальное распределение, гамма-распределение и др.

При обработке статистических данных принимают предположение /статистическую гипотезу/ о возможном законе распределения изучаемой величины $F(x)$ и его параметрах. Правильность статистической гипотезы должна быть доказана. Для этого используют ряд критериев, рассчитываемых по экспериментальным данным. Гипотеза считается истинной, если критерии, вычисленные по опытным данным, находятся в определенных границах рассчитанных теоретически значений для заданного уровня значимости, приведенные в таблицах. Обычно пользуются тремя уровнями значимости - 5%, 1% и 0,1% или 0,05%; 0,01; 0,001.

Для оценки статистических гипотез, когда случайная величина подчиняется нормальному закону распределения, используют χ^2 критерий /хи-квадрат/ Пирсона, t критерий Стьюдента, F критерий Фишера и др.

Критерий Пирсона показывает, случайно расхождение между эмпирическим и теоретическим распределением в связи с ограниченностью количества эксперимента или оно закономерно и принятая статистическая гипотеза неверна. С помощью χ^2 критерия проверяется гипотеза о величине дисперсии нормально распределенной случайной величины. Расхождение экспериментальных и теоретических данных характеризуется величиной

$$\chi^2 = \sum_i (m_i - np_i)^2 / np_i = \sum_i (f_i - p_i)^2 / p_i.$$

5.20/

где m_i - количество экспериментальных точек в i -м интервале; $N = \sum_i^N m_i$ - общее число данных в массиве; P_i - закон распределения вероятности; $f_i = \frac{m_i}{N}$ - частота.

Для оценки статистической гипотезы по χ^2 критерию объем выборки должен быть достаточно велик. Недостаток критерия - его нечувствительность определения адекватной модели при небольшом числе экспериментальных данных.

Схема применения критерия χ^2 :

1/ по экспериментальным данным рассчитывают среднее значение \bar{x} и дисперсию s^2 ;

2/ определяют диапазон изменения случайной величины ($x_{max} - x_{min}$) и разбивают его на K интервалов, число которых должно быть не менее 5, а количество точек в каждом интервале - не менее 10. Количество интервалов

$$K = 1 + 3,22 \lg N, \quad /5.21/$$

где N - объем выборки;

3/ в каждом интервале определяют количество экспериментальных точек m_i ;

4/ для каждого интервала находят величину нормированного отклонения от средней

$$u_i = (x_i - \bar{x})/s \quad /5.22/$$

и по табл.П.1.1 определяют $\Phi(u_i)$, после чего рассчитывают распределение вероятности

$$P_i = \Phi(u_i) - \Phi(u_{i-1}); \quad /5.23/$$

5/ вычисляют χ^2 критерий по /5.20/ и сравнивают его с табличным для заданного уровня значимости $\alpha /0,1; 0,05; 0,02; 0,01/$ и числа степеней свободы $V = K - 2 - 1$ где K - число интервалов; 2 - число связей в выборке, равное числу параметров, которые были рассчитаны на основе экспериментальных данных /в данном примере \bar{x} и s^2 из п.1, табл.П.1.3/;

6/ если расчетное значение χ^2 больше табличного, принятая модель распределения при заданном уровне значимости отвергается; если меньше табличного, теоретическая модель не противоречит экспериментальной.

В качестве примера рассмотрим распределение CaO в конечном шлаке марганцовской печи при выплавке стали марки СтЗкп. В табл.5.3 сгруппированы данные по 375 плавкам.

Таблица 5.3

Показатель	CaO, %					
	40-41	41-42	42-43	43-44	44-45	45 и более

Количество данных 23 107 149 81 12 3
Частота 0,0615 0,2861 0,3984 0,2139 0,0321 0,0080

По данным табл.5.3 находим среднее значение

$$\bar{x} = \frac{1}{375} [23 \cdot 40,5 + 107 \cdot 41,5 + 149 \cdot 42,5 + \dots + 3 \cdot 45,5] \approx 42,396;$$

и дисперсию $s^2 = 42,4$;

$$s^2 = \frac{1}{375-1} [23/40,5 - 42,4^2 + 107/41,5 - 42,4^2 + \dots + 3/45,5 - 42,4^2];$$

$$s^2 = 0,9384; s = 0,9687 \approx 0,97.$$

Рассчитываем нормированное значение величины для границ интервала и распределения вероятностей для интервалов. Предварительно объединяем последний и предпоследний интервалы вследствие количества данных в последнем интервале. Для первого интервала $U_{1,min} = \frac{40-42,4}{0,97} = -2,47$; $U_{1,max} = \frac{41-42,4}{0,97} = -1,44$; $P_1 = P(40 < x_i < 41) = \frac{1}{2}(\Phi(-1,44) - \Phi(-2,47)) = \frac{1}{2}(\Phi(2,47) - \Phi(1,44)) = \frac{1}{2} / 0,9865 - 0,8501 / = 0,0682$.

По аналогичной схеме рассчитываем $P_2 = 0,2697$; $P_3 = 0,3845$; $P_4 = 0,2215$; $P_5 = 0,0494$ (табл.5.4).

Таблица 5.4

$x_i \dots x_{i+1}$	m_i	P_i	nP_i	$m_i - nP_i$	$(m_i + nP_i)^2$	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$
40-41	23	0,0682	25,58	-2,58	6,66	0,26
41-42	107	0,2697	101,14	5,86	34,34	0,34
42-43	149	0,3845	144,19	4,81	23,14	0,16
43-44	81	0,2215	88,06	-2,06	4,24	0,05
44-46	15	0,0494	18,53	-3,53	12,46	0,67
375	0,9933					$\chi^2 = 1,48$

Для определения табличного значения χ^2 находим число степеней свободы $v = 5 - 2 - 1 = 2$ /количество интервалов 5, число связей 2, так как расчет выполнялся по данным экспериментального массива \bar{x} и σ^2 / . По табл. II.1.3 для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и $v = 2$ находим $\chi^2 = 5,99$. Таким образом, опытные данные не противоречат гипотезе о том, что содержание CaO в конечном марганцовском шлаке подчиняется закону нормального распределения.

Закон распределения по критерию χ^2 можно проверить на программируемом микрокалькуляторе /ом., например, [26]/.

Критерий Стьюдента /t-критерий/ используют при проверке гипотез о среднем значении случайной величины, описываемой законом нормального распределения, и сравнении двух средних \bar{x}_1 и \bar{x}_2 , нормально распределенных эмпирических массивов данных при известной величине оценки дисперсии σ^2 . С помощью t-критерия определяют интервал, в котором с заданным уровнем значимости находится математическое ожидание случайной величины; рассчитывают число испытаний, необходимых для получения среднего значения случайной величины с заданной точностью; сравнивают две средние нормально распределенные генеральные совокупности; устанавливают значимость коэффициентов в уравнении регрессии и т.д.

Пример 5.1. Оценить влияние применения кислорода на длительность плавки в 900-тонной марганцовской печи.

Длительность плавки определяется рядом технологических, организационных и теплотехнических факторов, в том числе и использованием кислорода для интенсификации процесса. В табл. 5.5 приведены данные о средней продолжительности плавок в отдельные сопоставимые периоды времени работы печи без применения и с использованием кислорода.

Таблица 5.5

Длительность плавки, ч		Разность $x_1 - x_2$	Квадрат разности $(x_1 - x_2)^2$
без применения кислорода x_1	с использованием кислорода x_2		
14,5	11,5	3,00	9,00
15,0	12,0	3,00	9,00
12,0	10,5	1,50	2,25
13,5	13,0	0,50	0,25
10,0	10,5	-0,50	0,25
Сумма	65,0	57,5	7,5
Среднее	$\bar{x}_1 = 13,0$	$\bar{x}_2 = 11,5$	20,75

Средняя продолжительность плавки без применения кислорода составляла 13 ч, с кислородом - 11,5 ч. Длительность плавки сократилась на 1,5 ч.

Находим среднеквадратичное отклонение по всем проведенным опытным и сравнительным плавкам

$$\frac{\sum (x_i - \bar{x}_2)^2}{n} = \frac{20,75}{5} = 4,15$$

и среднеквадратичное отклонение разностей

$$\sigma_{\text{разн}}^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_2)^2}{n} - (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2 = 4,15 - 1,5^2 = 1,9.$$

Оцениваем дисперсию

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{разн}}^2 n(n-1) = \frac{1,9 \cdot 5}{4} = 2,375$$

и вычисляем среднюю ошибку разностей средних

$$\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\sigma^2/n} = \sqrt{2,375/5} = 0,6892.$$

Находим

$$t = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / \sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = 1,5 / 0,6892 = 2,18,$$

т.е. разница средних в 2,18 раза больше средней ошибки разностей.

По табл.П.1.4 для числа степеней свободы \bar{x}_1 и \bar{x}_2 относятся к разным генеральным совокупностям. Она составляет 0,954 /95,4%/. Этого достаточно для утверждения, что сокращение длительности плавки вызвано применением кислорода.

Установление коэффициентов уравнения регрессии и тесноты связи между исследуемыми параметрами требует оценки достоверности /статистической значимости/ коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, который в данном случае записывается так:

$$t = \frac{\alpha_i}{\sigma_{\alpha_i}} = \frac{\alpha_i \sqrt{n}}{\sigma_y}, \quad 15.24/$$

где α_i - коэффициент i -го члена уравнения регрессии; $\sigma_{\alpha_i} = \sigma_y / \sqrt{n}$ - ошибка определения α ; n - количество проведенных опытов; σ_y - ошибка воспроизводимости опытов;

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}. \quad 15.25/$$

Значение t , вычисленное по 15.24/, сравнивают с табличным t_{kp} , соответствующим числу степеней свободы $v = n - k - 1$, где k - количество членов уравнения без нулевого/.

При $t > t_{кр}$ коэффициент регрессии считается статистически значимым и может быть использован для оценки степени влияния изучаемого фактора.

Критерий Фишера / F -критерий/ используют при проверке гипотезы о равенстве дисперсий двух независимых нормально распределенных случайных величин на основе их оценки, полученных опытным путем /табл.П.1.6/.

Критические значения F для различных уровней значимости и степеней свободы v_1 и v_2 приводятся во многих справочниках и учебных пособиях по математической статистике. Уровень значимости обычно выражается в процентах или в долях единицы.

Проверка статистической гипотезы основана на том, что отношение оценок дисперсий двух выборок $F = \sigma_1^2/\sigma_2^2$ подчиняется распределению Фишера со степенями свободы $v_1 = n_1 - 1$ и $v_2 = n_2 - 1$. Если отношение σ_1^2/σ_2^2 больше табличного значения F_{α, v_1, v_2} для заданного уровня значимости, то альтернативная гипотеза отвергается. Иными словами, нельзя утверждать с принятой вероятностью, что рассматриваемые выборочные массивы относятся к одной и той же генеральной совокупности.

§ 4. Первичная обработка экспериментальных данных

Количественная оценка экспериментальных данных проводится методами математической статистики, которая используется почти в любом исследовании, особенно связанном с анализом массового производства, поэтому необходимо представлять круг решаемых ею задач и владеть ее методами. Математическая статистика опирается на теорию вероятностей и применяется для обработки опытных данных, что обусловлено случайным характером измеряемых величин и ошибок измерения, большим разнообразием влияющих на исследуемые процессы факторов, многие из которых не поддаются непосредственному учету, и значительным объемом выборки, особенно при изучении массовых производственных процессов.

При многократном измерении получают разные значения величины; соответствующее эмпирическое среднее является оценкой математического ожидания – важнейшей числовая характеристики случайных величин. Методы математической статистики позволяют оценить достоверность полученного результата и область, в которой с требуемой степенью вероятности будет находиться искомое значение. Статистическая обработка результатов наблюдений дает возможность заменить субъективную оценку явления объективной, качественный анализ дополнить количественным описанием,

что, в конечном итоге, способствует конкретизации знаний об изучаемых явлениях. Отметим, что надежность статистического анализа и его достоверность зависят от точности исходных данных. С помощью методов математической статистики определяются основные факторы и их количественное влияние на изучаемые явления, обобщаются и описываются экспериментальные данные в виде математических моделей, устанавливается достоверность полученных зависимостей и их адекватность изучаемым процессам и явлениям.

Получаемый исследователем экспериментальный материал представляет собой неупорядоченный набор сведений. Для удобства анализа данные опытов необходимо систематизировать и обобщить, сопоставить с теоретическими положениями, с имеющимися в литературе физико-химическими моделями. В ряде случаев результаты экспериментов служат основой для создания новых или уточнения существующих теорий, моделей процессов, алгоритмов управления.

Первичная обработка экспериментальных данных заключается в их систематизации /помещении данных в таблицах или на отдельных карточках/, определении диапазона изменения функции и аргумента, средних значений величин и их частотных характеристик. Для наглядности на основе первичных данных строят графики зависимости исследуемой величины от факторов, которые изменялись в ходе эксперимента. К первичной обработке относится и подбор эмпирических формул по зависимостям, полученным на графиках, а также исключение грубых ошибок и оценка точности экспериментальных данных.

Материал в таблицах располагают в хронологической последовательности /временной ряд/ или в соответствии с изменением одного из основных параметров /ряды распределения/. Временной ряд целесообразно использовать при анализе текущего производства, изучении технико-экономических показателей процесса, сравнении серии опытных плавок с плавками валового производства, ряды распределения – при анализе результатов исследования.

Работать с таблицами, состоящими из сотен строк и нескольких десятков граф, очень неудобно, поэтому при большом объеме материала не рекомендуется вносить в таблицы данные, полученные только в небольшой части опытов или в какой-то мере дублирующие уже имеющиеся. Целесообразно по возможности объединять данные идентичных опытов с указанием количества обобщенного материала; из ряда значений, несущих одинаковую информацию, использовать только те, которые более достоверны и точны. Если таблица остается достаточно большой, ее можно разделить на не-

сколько меньших. Расчетные таблицы должны быть более подробными и в их рабочем варианте необходимо отражать промежуточные результаты, что упрощает проверку расчетов. В окончательном варианте в таблицах оставляют только исходные данные и полученные результаты.

При большом числе опытов результаты каждого из них лучше в определенном порядке /с помощью градарета/ записать на отдельную карточку. Это облегчит дальнейшую систематическую обработку материала – сортировку по группам для составления частотных распределений в пределе данной выборки, анализа зависимостей при заданном уровне одного из факторов и др.

Обобщающими характеристиками ряда экспериментальных данных служат средние величины и характеристики изменчивости /рассеяния/, которые легко рассчитать после составления таблиц. Для нахождения зависимостей между исследуемыми параметрами по экспериментальным данным строят графики. Функции и аргументы выбирают на основании известных физико-химических зависимостей между изучаемыми величинами или технологий процесса. На оси абсцисс откладывают аргумент, на оси ординат – функцию. Допускаются различные масштабы шкал по осям, шкала не обязательно должна начинаться с нуля, в качестве начала отсчета можно использовать одно из граничных значений фактора. Оси графика могут иметь линейную или логарифмическую шкалу, обусловленную диапазоном величины и характером зависимости. Для наглядности на одном графике целесообразно располагать несколько кривых, соответствующих различным условиям опытов.

Ломаная, проведенная через экспериментальные точки графика, называется эмпирической линией регрессии. Предельную форму, к которой она стремится при неограниченном увеличении числа наблюдений /экспериментальных точек/, называют теоретической линией регрессии /рис.5.6/.

Для выявления экспериментальных зависимостей проще всего выбрать эмпирические формулы по графикам, которые позволяют легко определить параметры линейной зависимости вида $y = kx + \alpha$ /где α – значение функции при нулевом аргументе; $k = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2)$ – тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, вычисляемый по координатам двух точек/. Точность уравнения зависит от того, насколько прямая близка к экспериментальным точкам. .

Параметры более сложных зависимостей находят, приводя последние к линейной форме методом выравнивания. Тип эмпирической формулы устанавливают по виду кривой на графике. Во многих случаях экспериментальные точки можно представить математическими выражениями разного вида. Тогда из нескольких формул выбирают ту, которая наиболее полно описы-

вает опытные данные и соответствует физико-химической модели процесса. В табл.5.6 приведены некоторые кривые, их уравнения и новые переменные, вводимые при выравнивании.

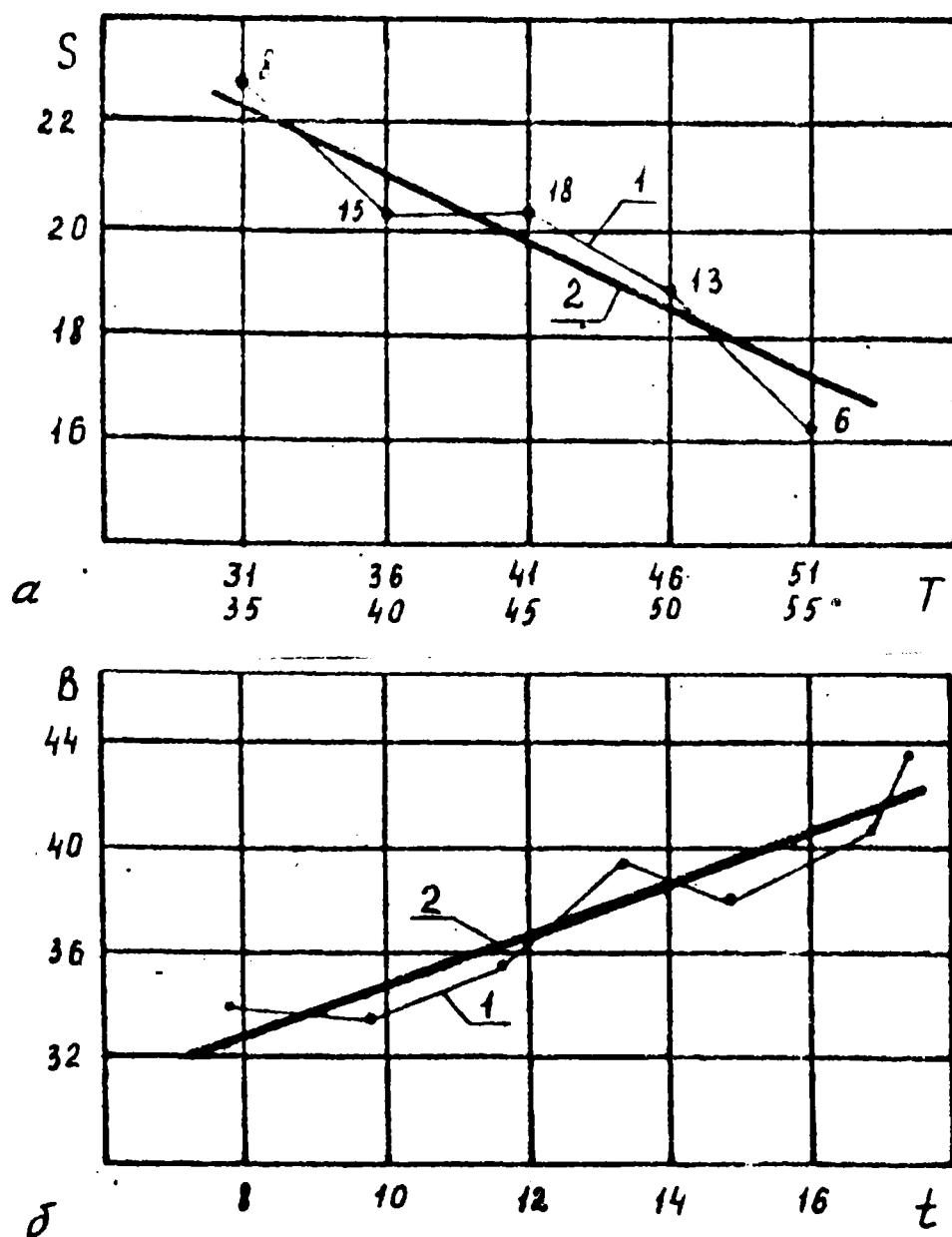
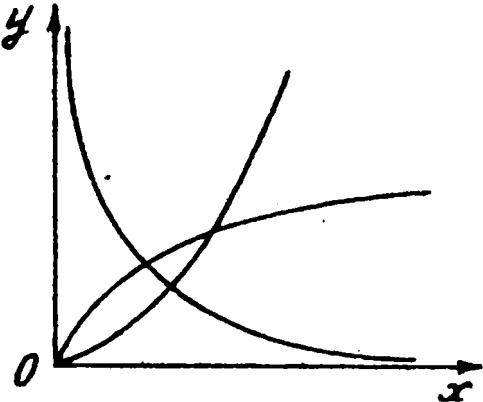
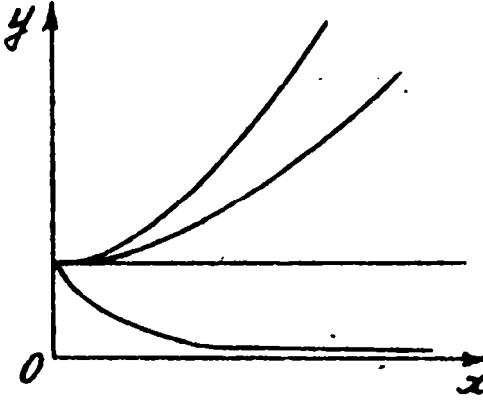
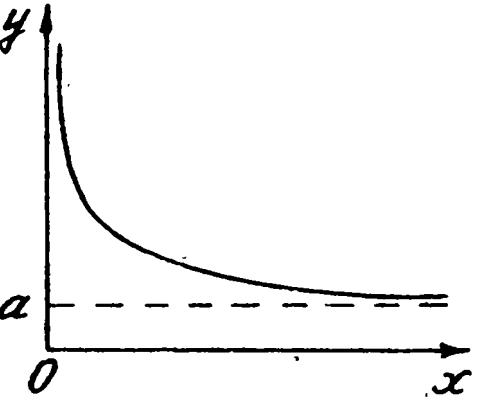


Рис.5.6. Пример построения экспериментальных кривых:
а - по единичным данным; б - по усредненным
данным /цифры у точек означают количество
усредненных данных/; 1 - эмпирическая линия
регрессии; 2 - теоретическая линия регрессии

Таблица 5.6

Кривые	Формула	Линейная формула и новые переменные
	$y = \alpha x^b$	$y = \lg a + b \lg x$ $y = \lg y$ $x = \lg x$
	$y = \alpha b^x$ или $y = \alpha e^{cx}$	$y = \lg a + x \lg b$ или $y = \ln a + cx$ $y = \lg y$ или $y = \ln y$
	$y = \alpha + \frac{\beta}{x}$	$y = ax + b$ $y = xy$

При графическом подборе эмпирической зависимости характерными точками являются граничные и средние значения. Соответствие полученной зависимости всему массиву опытных данных проверяется по величине их отклонений от расчетных значений во всем диапазоне измерений. Наилучшие параметры эмпирических уравнений определяют методом наименьших квадратов.

Общее представление о характере и структуре изучаемой совокупности экспериментальных величин дает кривые частотного распределения, которые являются аналогами плотности распределения вероятностей и функции распределения вероятностей /см. § 1/. Для построения частотных характеристик весь диапазон варьирования исследуемого параметра разбивают на ряд интервалов. Число последних не должно быть очень большим, так как в этом случае в отдельные интервалы попадают мало точек и усреднение по ним может быть нехарактерным для данной зависимости. При небольшом числе интервалов невозможно выявить особенности исследуемого объекта, так как в этом случае кривая сглаживается. Количество интервалов должно быть нечетным. Оптимальный размер интервала

$$H = \frac{P}{1 + 3,322 \lg n}, \quad /5.26/$$

где $P = x_{\max} - x_{\min}$ – размах вариации /разность между максимальным и минимальным значениями фактора/; n – количество экспериментальных данных.

В пределах каждого интервала подсчитывают количество точек и находят долю или процент общего числа выборки. Эти величины представляют в виде графика /рис.5.7/ или гистограммы /рис.5.8/.

На оси абсцисс откладывают интервалы или их средние значения, на оси ординат – частоту случаев f . Частотное распределение может быть представлено кумулятивной кривой. В этом случае последовательно суммируются частоты всех интервалов, начиная с минимального.

Экспериментальные данные с количеством интервалов до 14 для построения графиков частотного распределения можно сгруппировать с помощью программированных микрокалькуляторов. Далее приведена программа для построения гистограммы с количеством интервалов до 7. После набора программы в регистры памяти 8, 9, **A**, **B**, **C**, **D** записывают значения границ интервалов. Остальные регистры памяти обнуляют. Затем последовательно набирают и вводят в микрокалькулятор все данные массива. В регистрах I-7 суммируется количество данных, попадающих в 1-й, 2-й и последующие интервалы. После ввода всех данных количество точек, попав-

ших в каждый интервал, определяется вызовом из соответствующего регистра памяти. Нажимая клавишу С/П, получаем накопление суммы для построения кумулятивной кривой.

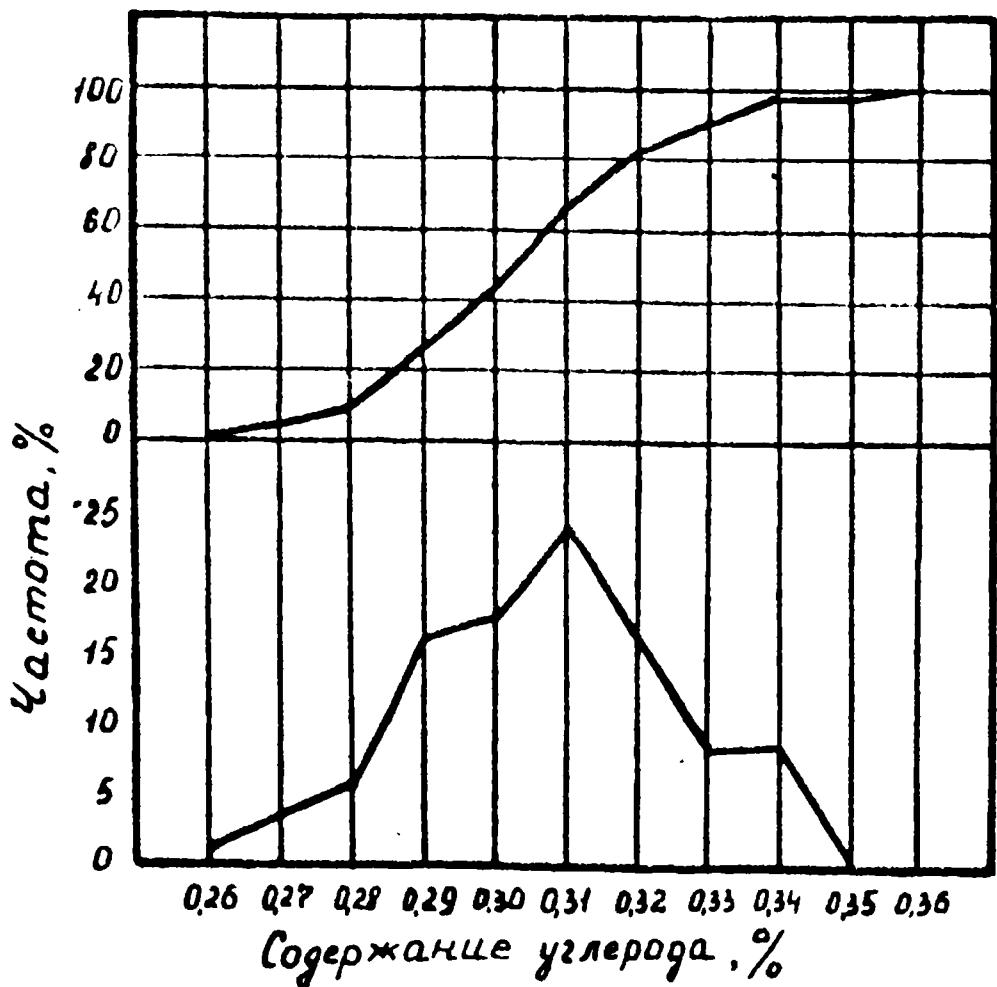


Рис.5.7. Частотное распределение плавок стали по содержанию углерода: 1 - частота случаев; 2 - накопленная частота /кумулятивная кривая/

Программа обработки массива экспериментальных данных для построения гистограммы с количеством интервалов до 7

ПО	ИП0	С/П	ПО	ИП8	- $F_x < 0$	I3	ИП1	I
+	П1	В/О	ИП0	ИП9	- $F_x < 0$	23	ИП2	I
+	П2	В/О	ИП0	ИПА	- $F_x < 0$	33	ИП3	I
+	П3	В/О	ИП0	ИПВ	- $F_x < 0$	40	КИП4	В/О
ИП0	ИПС	-	$F_x < 0$. 47	КИП5	В/О	ИП0	ИПД
$F_x < 0$	54	КИП6	В/О	ИП7	I	+	П7	В/О КНОП

ИП1	С/П	ИП2	+	С/П	ИП3	+	С/П	ИП4	+	С/П
С/П	ИП5	+ С/П		ИП6	+ С/П		ИП7	+ С/П		
0	<i>F1/x</i>	С/П.								

Обобщающими характеристиками ряда экспериментальных данных служат различные средние величины и характеристики рассеивания /см. § 2/.

Приведем программу вычисления среднего и дисперсии с помощью микрокалькулятора.

Программа вычисления среднего, дисперсии, асимметрии и эксцесса экспериментального массива данных

ИПС	С/П	П6	ИП1	+	П1	ИП6	<i>Fx²</i>	ИП2	+	
П2	ИП6	<i>Fx²</i>	ИП6	x	ИП3	+ П3	ИП6	<i>Fx²</i>		
<i>Fx²</i>	ИП4	+	П4	<i>FLO</i>	00	ИП1	ИПА	+	П1	
С/П	ИП2	ИПА	+	П2	ИП3	ИПА	+	П3	ИП4	
ИПА	+	П4	ИП2	ИП1	<i>Fx²</i>	- ПВ	С/П	ИП1		
<i>Fx²</i>	2	x	ИП2	3	x	- ИП1	x	ИП3		
+	ПС	ИП2	2	x	ИП1	<i>Fx²</i>	- ИП1	x		
3	x	4	+	ИП3	-	ИП1	x	4	x	
ИП4	+	ПД	ИПС	ИПВ	↑	<i>Fx²</i>	x	<i>F-F</i>	+	
С/П	ИПД	ИПВ	<i>Fx²</i>	+	3	-	С/П			

В программе шаги 01-26 по циклу *FLO* /регистр *Р0/* означают накопление сумм x_i (*P1*), x_i^2 (*P2*), x_i^3 (*P3*) и x_i'' (*P4*). Далее /27-31/ рассчитывается \bar{x} , затем /32-48/ - σ_x^2 , шаги 49-91 означают асимметрию выборки А, шаги 92-98 - величину эксцесса Е /рис.5.9/.

После набора программы и перехода в режим вычислений в регистры памяти Р0 и РА вводится число данных массива *N*, а регистры памяти Р1-Р6 обнуляются. Данные массива вводят последовательно нажатием клавиши С/П. После ввода последнего числа массива в регистре *PX* высвечивается значение \bar{x} . При последующем нажатии клавиши С/П получаем значение σ_x^2 .

Если *N < 30*, полученное значение нужно умножить на величину *N/(N-1)*. Поскольку значение *N* находится в регистре РА, пересчет ведут нажатием клавиши ИПАхИПА I - +. Далее, нажав на клавишу С/П, получают величину асимметрии *A* и после следующего нажатия С/П - величину эксцесса *E*.

По значениям \bar{x} , σ_x^2 , *A* и *E* делается вывод о законе распределения чисел в массиве. Так, для закона нормального распределения *A = 0*; *E = 0*. Для массивов экспериментальных данных величины *A* и *E* обычно отличны от нуля. О возможности применения закона нормального распреде-

ления можно судить, сравнивая величины A и E с расчетными значениями вспомогательных коэффициентов K_A и K_E :

$$K_A = \sqrt{\frac{6(N-1)}{(N+1)(N+3)}}; \quad K_E = \sqrt{\frac{24N(N-2)(N-3)}{(N-1)^2(N+3)(N+5)}}. \quad 15.27/$$

Если значение K_A и K_E в 2-3 раза больше, чем A и E , то с достаточным основанием можно считать, что распределение чисел в массиве подчиняется нормальному закону. На рис.5.9 показан характер распределения в зависимости от значений A и E . В рассмотренной программе длительность счета при вводе каждого члена массива около 10 с. При большом числе данных /несколько сот и более/ в массиве использование этой программы вызывает определенные трудности.

Обычно большие массивы данных при первичной обработке группируют по интервалам. Указанную программу можно использовать для расчета по сгруппированным данным, несколько изменив ее первую часть:

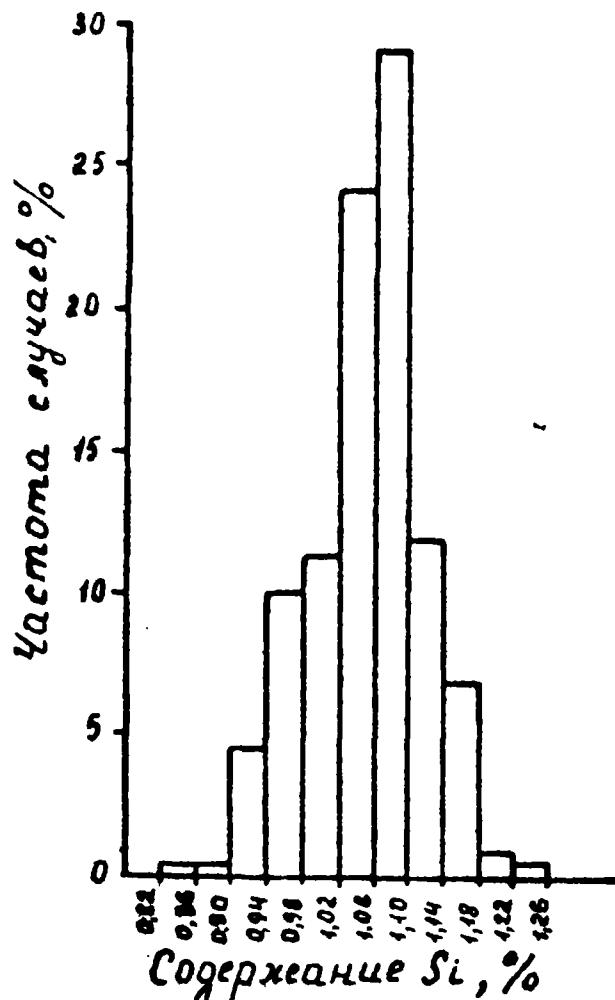


Рис.5.8. Гистограмма частотного распределения плавок по содержанию кремния

С/П	П6	ИП7	x	ИП1	Fx^2	П1	ИП6	Fx^2	ИП7
x	ИП2	+	П2	ИП6	Fx^2	ИП6	x	ИП7	x
ИП3	+	П3	ИП6	Fx^2	Fx^2	ИП7	x	ИП4	+
П4	FLO	00							

Остальную часть программы /с 27-го шага/ записывают без изменений. Программу увеличивают до 105 шагов. В таком виде ее можно использовать только на МК-52 и МК-61. В регистр А заносится общее число данных мас-

сива N , в регистр 0 - число интервалов разбики данных, в регистр Р7 - число данных в интервале, а в регистр РХ - среднее значение \bar{x} ; в интервале. Дальнейший порядок работы соответствует описанному.

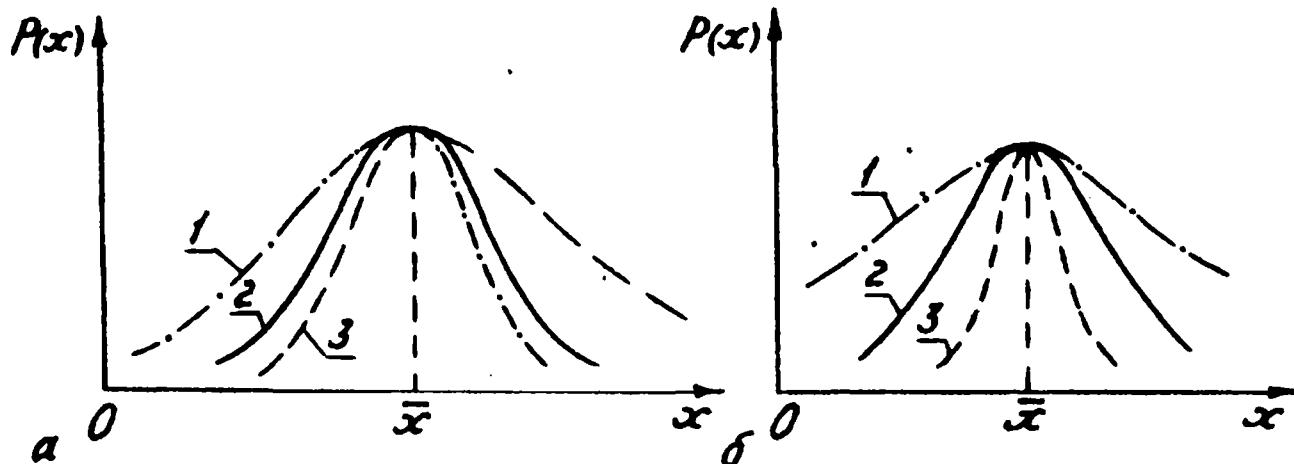


Рис.5.9. Функции плотности распределения: а - при разной асимметрии /1 - $A < 0$; 2 - $A = 0$; 3 - $A > 0$ /; б - эксцесс /1 - $E < 0$; 2 - $E = 0$; 3 - $E > 0$ /

По этой программе рассчитаем массив данных, приведенных в табл.5.1 / $\bar{x} = 3,075 \cdot 10^{-1}$; $\sigma_x = 3,27615 \cdot 10^{-4}$; $A = -5,96977 \cdot 10^{-2}$; $E = 2,9716 \cdot 10^{-2}$ /; коэффициенты / $K_A = 0,1633$ и $K_E = 0,3222$ / и отношения / $(K_A/A) = -2,73$ и $(K_E/E) = -10,84$ /, что дает основание считать, что содержание углерода в стали 30ХГСА подчиняется закону нормального распределения.

Расчеты среднего и дисперсии экспериментального массива позволяют оценить случайные ошибки и исключить грубые ошибки /промахи/, возникающие в процессе измерения и накладывающиеся на его результат вследствие методических погрешностей, недостаточной точности или неисправности приборов, ошибок исследователя.

Грубые ошибки значительно отличаются по величине от остальных измерений и сильно влияют на среднее и дисперсию. Поэтому они должны исключаться при обработке данных.

Случайные ошибки определяются по величине в основном точностью измерений и возникают по многочисленным причинам, не поддающимся точному учету.

Вероятная ошибка измерений ρ делит область распределения ошибок пополам, т.е. половина отклонений от среднего будет меньше ρ , а вторая половина - больше ρ :

$$\rho = 0,675 \sigma.$$

/5.28/

Точность отдельного измерения характеризуется мерой точности

$$h = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma^{-1} = 0,7071 \sigma^{-1}. \quad /5.29/$$

Средняя абсолютная ошибка отдельного измерения

$$U = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \sigma = 0,797 \sigma. \quad /5.30/$$

Максимально возможная случайная ошибка с вероятностью 0,997/
 $\Delta = 3\sigma$.

Все измерения, отличающиеся от среднего на величину, большую 3 σ , исключаются как грубые ошибки.

Для оценки точности полученных результатов используются следующие величины:

мера точности среднего арифметического

$$H = h \sqrt{n} = \frac{\sqrt{n}}{6\sqrt{2}}, \quad /5.31/$$

где n – количество измерений;

среднеквадратичная ошибка среднеарифметического

$$\sigma_o = \sigma / \sqrt{n}; \quad /5.32/$$

вероятная ошибка среднеарифметического

$$\rho_o = 0,675 \sigma_o; \quad /5.33/$$

максимально возможная ошибка среднеарифметического

$$\Delta_o = 3\sigma_o. \quad /5.34/$$

Пример 5.2. Выполнить первичную обработку результатов измерений величины /табл.5.7/.

Таблица 5.7

Номер опыта	x_i								
1	132	5	138	9	126	13	137	17	138
2	127	6	128	10	142	14	124	18	129
3	132	7	137	11	126	15	135	19	132
4	125	8	182	12	130	16	149	20	131

$$\sum = 2700$$

Значительные отклонения по величине x_i , наблюдаются в опытах 8 и 16, что может расцениваться как грубые ошибки.

Среднеарифметическое всех измерений

$$\bar{x}_i = 2700 : 20 = 135.$$

Результаты расчета дисперсии и среднеквадратичного отклонения приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Номер опыта	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$	Номер опыта	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$	Номер опыта	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	-3	9	8	+47	2209	15	0	0
2	-8	64	9	-9	81	16	+14	196
3	-3	9	10	+7	49	17	+3	9
4	-10	100	11	-9	81	18	-6	36
5	+3	9	12	-5	25	19	-3	9
6	-7	49	13	+2	4	20	-4	16
7	+2	4	14	-11	121			

$$\sum_{i=1}^{20} (x_i - \bar{x}) = 0; \quad \sum_{i=1}^{20} (x_i - \bar{x})^2 = 3080;$$

$$s_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^{20} (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{3080}{20-1} = 162,105; \quad s_1 = 12,73.$$

Максимально возможная ошибка измерения $\Delta = 3s_1 = 3 \cdot 12,73 \approx 38,2$.

Для опыта 8 $x_8 - \bar{x} = 49 > 38,2$, что свидетельствует о грубой ошибке. В опыте 16 ($x_{16} - \bar{x} = 14 < 38,2$) ошибка в пределах случайной.

Проводим повторное измерение в опыте 8 и проверяем черновую запись. В опыте 8 $x_8 = 132$. Ошибка возникла при записи данных в таблицу.

Находим новые значения среднего $\bar{x}_2 = \frac{2700 - 50}{20} = 132,5$, дисперсии $s_2^2 = \frac{755}{19} = 39,7$ и среднеквадратичного отклонения $s_2 = \sqrt{39,7} \approx 6,3$. Максимально возможная ошибка $\Delta_2 = 3 \cdot 6,3 = 18,9$. Проверяем результат опыта 16: $\Delta_{16} = 149 - 132,5 = 16,5 < 18,9$. Ошибка измерения в опыте 16 случайная. Следовательно, необходимо учесть результаты всех 20 опытов.

Вычисляем:

среднеквадратичную ошибку среднеарифметического

$$s_0 = \frac{s_1}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{755}{19 \cdot 20}} \approx 1,4; \quad \bar{x} = 132,5 \pm 1,4;$$

вероятные ошибки отдельных измерений и среднеарифметического

$$\rho = 0,675 \quad \sigma = 0,675 \cdot 6,3 \approx 4,25; \quad \rho_o = 0,675 \quad \sigma_o = 0,675 \cdot 1,4 = 0,95;$$

меру точности отдельных результатов и среднеарифметического

$$h = \frac{0,7071}{\sigma} = \frac{0,7071}{6,3} \approx 0,11; \quad H = h \sqrt{n} = 0,11 \cdot \sqrt{20} \approx 0,49.$$

§ 5. Метод наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов – основной метод статистической обработки результатов исследования, позволяющий решить, какое из произвольных уравнений дает наилучшее приближение к фактической зависимости.

Пусть для описания исследуемой зависимости выбрано уравнение $y_i = f(x_i)$, согласно которому значению аргумента x_i должно соответствовать значение функции $f(x_i)$. На самом деле значению x_i соответствует иное значение функции y_i . Получается отклонение фактических значений от расчетных $y_i - f(x_i)$. Общей мерой такого отклонения будет дисперсия

$$D = \frac{1}{n} \sum [y_i - f(x_i)]^2, \quad /5.35/$$

где n – общее количество измеренных значений функции /объем выборки/.

Сущность метода наименьших квадратов заключается в том, что наилучшее приближение к истинной зависимости дает такое уравнение, для которого сумма квадратов отклонений экспериментальных и расчетных данных имеет минимальное значение, т.е.

$$S = \sum [y_i - f(x_i)]^2 \rightarrow \min. \quad /5.36/$$

Для сравнения обычно выбирают уравнения определенного типа, но с неизвестными коэффициентами. Величину S можно рассматривать как функцию коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_n исходного уравнения. Задача состоит в том, чтобы найти значения коэффициентов уравнения, соответствующие минимуму S .

Известно, что необходимым условием минимума дифференцируемой функции является равенство нулю первых производных. В данном случае

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0, \dots, \quad \frac{\partial S}{\partial a_n} = 0. \quad /5.37/$$

Эти равенства можно рассматривать как систему нормальных уравнений относительно коэффициентов $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$, которая имеет единственное решение, минимизирующее величину S .

Рассмотрим применение метода наименьших квадратов на примере линейной зависимости типа $y = \alpha_0 + \alpha_1 x$. Отклонение линейного уравнения от искомой прямой в отдельных точках может быть записано в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= y - y_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 - y_1; \\ \Delta y_2 &= y - y_2 = \alpha_0 + \alpha_1 x_2 - y_2; \\ &\vdots \\ \Delta y_n &= y - y_n = \alpha_0 + \alpha_1 x_n - y_n.\end{aligned} \quad /5.38/$$

Если в каждом частном уравнении системы /5.38/ левую и правую части возвести в квадрат и сложить все уравнения, получим сумму квадратов отклонений

$$\sum_i^n (\Delta y_i)^2 = \sum_i^n (\alpha_0 + \alpha_1 x_i - y_i)^2. \quad /5.39/$$

Приравняем к нулю частные производные:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sum_i^n (\Delta y_i)^2}{\partial \alpha_0} = 2 \sum_i^n (\alpha_0 + \alpha_1 x_i - y_i) = 0; \\ \frac{\partial \sum_i^n (\Delta y_i)^2}{\partial \alpha_1} = 2 \sum_i^n x_i (\alpha_0 + \alpha_1 x_i - y_i) = 0. \end{array} \right. \quad /5.40/$$

После ряда простейших преобразований получим

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i^n y_i = n \alpha_0 + \alpha_1 \sum_i^n x_i; \\ \sum_i^n x_i y_i = \alpha_0 \sum_i^n x_i + \alpha_1 \sum_i^n x_i^2. \end{array} \right. \quad /5.41/$$

Решая /5.41/, находим значения коэффициентов α_0 и α_1 .

Если теоретические предпосылки и подбор эмпирических формул не позволяет выбрать линейную связь, используют разложение в ряд Тейлора

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_k x^k. \quad /5.42/$$

Как правило, при обработке данных в виде многочлена K -й степени достаточно ограничиться первыми тремя членами ряда. Для уравнения вто-

- рого порядка значения коэффициентов $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ определяются по методу наименьших квадратов системой уравнений

$$\begin{cases} \sum y_i = \alpha_0 + \alpha_1 \sum x_i + \alpha_2 \sum x_i^2; \\ \sum x_i y_i = \alpha_0 \sum x_i + \alpha_1 \sum x_i^2 + \alpha_2 \sum x_i^3; \\ \sum x_i^2 y_i = \alpha_0 \sum x_i^2 + \alpha_1 \sum x_i^3 + \alpha_2 \sum x_i^4. \end{cases} \quad /5.43/$$

Для многочлена любой степени метод наименьших квадратов дает систему уравнений

$$\begin{cases} \sum y_i = \alpha_0 + \alpha_1 \sum x_i + \dots + \alpha_k \sum x_i^k; \\ \dots \\ \sum x_i^{k-1} y_i = \alpha_0 \sum x_i^{k-1} + \alpha_1 \sum x_i^k + \dots + \alpha_k \sum x_i^{2k}. \end{cases} \quad /5.44/$$

Если коэффициенты в уравнениях первого и второго порядка можно рассчитать с помощью клавишных ЭВМ, то для более сложных систем требуются быстродействующие ЭВМ.

§ 6. Регрессионный анализ

Цель большинства металлургических исследований - определить количественную зависимость показателей процесса от одного или от группы факторов, колебания которых в реальных условиях случайны. Установление количественной связи между случайными величинами является основной задачей регрессионного анализа.

При регрессионном анализе каждому значению неслучайного параметра ставится в соответствие распределение значений зависимой случайной величины. Если это распределение нормально, оно полностью характеризуется средним значением и дисперсией. Изменение среднего значения функции /при неизменной дисперсии/ в зависимости от изменения аргумента называется регрессией.

Если на графике нанести средние значения функции для отдельных значений аргумента и соединить их прямыми, то получится эмпирическая линия регрессии /см. рис. 5.6/. Теоретическую /истинную/ линию регрессии можно получить только в том случае, когда известны частные средние для всех возможных значений аргумента. Поэтому на практике любое уравнение регрессии является приближенным.

Одна из важнейших задач регрессионного анализа - выбор вида уравнения регрессии, с помощью которого аппроксимируется исследуемая зависимость. Как правило, если неизвестна физико-химическая природа связи между величинами, рекомендуется выбирать такой вид уравнения, в котором необходимое число неопределенных коэффициентов минимально.

В большинстве случаев достаточно ограничиться уравнением первой степени вида $y = \alpha_0 + \alpha_1 x$. Для случая линейной регрессии значения коэффициентов α_0 и α_1 рассчитываются с помощью метода наименьших квадратов из выражений

$$\alpha_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}; \quad 15.45/$$

$$\alpha_0 = \frac{\sum y_i - \alpha_1 \sum x_i}{n}. \quad 15.46/$$

Коэффициент α_1 называется коэффициентом регрессии, а коэффициент α_0 — свободным членом регрессии.

Даже в тех случаях, когда регрессия будет заведомо нелинейной, линейную регрессию целесообразно использовать как первый этап исследований, чтобы внести затем необходимые уточнения. Обычно уравнение регрессии находят в несколько этапов путем последовательных уточнений. На первом этапе определяют коэффициенты уравнения первого порядка. Затем к ним постепенно добавляют новые члены уравнения /второго, третьего и других порядков/. Известно, что любая непрерывная функция может быть аппроксимирована многочленом /разложением в ряд Тейлора/. При этом повышение точности аппроксимации достигается за счет увеличения степени многочлена. Добавляемые члены получаются, как правило, со все меньшими коэффициентами, пока, наконец, эти добавки не перестанут быть значимыми по сравнению со случайной ошибкой эксперимента. Контроль необходимости добавки новых членов в уравнение регрессии осуществляется по величине дисперсии. Для уравнения регрессии вида

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_k x^k \quad 15.47/$$

дисперсия

$$D_k = \frac{1}{n-k-1} \sum_i^n (y_i - \alpha_0 - \alpha_1 x_i - \alpha_2 x_i^2 - \dots - \alpha_k x_i^k)^2. \quad 15.48/$$

Как только D_{k+1} перестанет быть значимо меньше D_k , увеличение степени многочлена k следует прекратить. Значимость различия между D_{k+1} и D_k проверяется по критерию Фишера:

$$\frac{D_k}{D_{k+1}} > F_{1-\rho(\nu_1, \nu_2)}. \quad 15.49/$$

Значение F -критерия принимается по табл. II.1.6 для степеней свободы $\nu_1 = n - k$ и $\nu_2 = n - (k+1)$ и выбранного уровня значимости ρ .

Таким образом, сущность регрессионного анализа заключается в последовательном вычислении коэффициентов уравнения регрессии $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ и соответствующих дисперсий D_k . При этом следует иметь в виду, что при переходе от k -й степени к $(k+1)$ -й в уравнение регрес-

ции не просто добавляется одно слагаемое вида $\alpha_{K+1} x^{K+1}$, а целый многочлен $(K+1)$ -й степени, содержащий $K+2$ новых неизвестных коэффициентов.

Решение задачи существенно упрощается с применением метода Чебышева в случае, когда значения аргумента x_i изменяются с одним интервалом. Тогда для определения добавляемого многочлена вида $\alpha_{K+1} x^{K+1} P_{K+1}(x)$ при каждом увеличении степени регрессии достаточно вычислить только коэффициент α_{K+1} . Значение многочлена $P_{K+1}(x)$, называемого многочленом Чебышева, зависит только от объема выборки n .

Первые два многочлена Чебышева $P_0(x) = 1$; $P_1(x) = x - \frac{n+1}{2}$, а остальные можно определить так:

$$P_{K+1}(x) = P_1(x) P_K(x) - \frac{K^2(n^2-K^2)}{4(4K^2-1)} P_{K-1}(x); \quad /5.50/$$

например, $P_2(x) = x^2 - (n+1)x + \frac{(n+1)(n+2)}{6}$.

Общий вид уравнения регрессии K -порядка

$$y = \alpha_0 P_0(x) + \alpha_1 P_1(x) + \dots + \alpha_K P_K(x). \quad /5.51/$$

Коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_K$ находят из следующих выражений, полученных методом наименьших квадратов:

$$\alpha_0 = \frac{\sum y_i}{n}; \quad \alpha_1 = \frac{\sum y_i P_1(x)}{\sum P_1^2(x)}; \quad \alpha_K = \frac{\sum y_i P_K(x)}{\sum P_K^2(x)}. \quad /5.52/$$

Знаменатели дробей в этих выражениях рассчитываются по сокращенной формуле

$$\sum P_K^2(i) = \frac{(K!)^2 n(n^2-1)(n^2-4)\dots(n^2-K^2)}{[(2K-1)!!]^2 2^{2K} (2K+1)}. \quad /5.53/$$

В частности,

$$\sum P_1^2(i) = \frac{n(n^2-1)}{12}; \quad \sum P_2^2(i) = \frac{n(n^2-1)(n^2-4)}{180};$$

$$\sum P_3^2(i) = \frac{n(n^2-1)(n^2-4)(n^2-9)}{2800}.$$

В этих формулах каждое значение x_i заменено своим номером $Z_i = i$ при условии замены переменных $Z = \frac{x-x_i}{h} + 1$, где h — интервал изменения x_i .

Для определения дисперсии при каждом повышении порядка регрессии используется выражение

$$D_K = \frac{s_K}{n-K-1}. \quad /5.54/$$

Сумма квадратов отклонений

$$S_K = S_{K-1} - \alpha_K^2 \sum_{i=1}^n P_K^2(i), \quad /5.55/$$

а необходимое для вычисления S ,

$$S_0 = \sum_{i=1}^n [y_i - \alpha_0 P_0(x)]^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2. \quad /5.56/$$

После того, как уравнение регрессии установлено, переменную Z снова заменяют первоначальной переменной x .

Пример 5.3. Применив метод Чебышева, найти уравнение регрессии зависимости ЭДС вольфрамрениевской термопары от температуры при следующих исходных данных:

$t, {}^\circ\text{C}$: 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400
E, мВ	: 11,270 12,940 14,560 16,130 17,695 19,215 20,655 22,075
$t, {}^\circ\text{C}$: 1500 1600 1700
E, мВ	: 23,455 24,715 26,005

Заменим исходные данные. Значения температуры отличаются друг от друга на 100 ${}^\circ\text{C}$. Это позволяет сделать замену в виде $Z = \frac{t - 600}{100}$, и тогда каждое t заменяется своим номером $Z_i = i$. Для удобства вычислений заменим измеренные значения ЭДС с помощью выражения $y = E - 11,27$.

Полученные после замены значения Z и y помещаем в графы 1, 2 табл. 5.9.

Таблица 5.9

$Z_i = i$	y_i	y_i^2	$P_1(i)$	$y_i P_1(i)$	$P_2(i)$	$y_i P_2(i)$
I	2	3	4	5	6	7
1	0	0	-5	0	15	0
2	1,67	2,79	-4	-6,68	6	10,02
3	3,29	10,82	-3	-9,87	-1	-3,29
4	4,86	23,62	-2	-9,72	-6	-29,16
5	6,42	41,22	-1	-6,42	-9	-57,78
6	7,85	61,62	0	0	-10	-78,50
7	9,38	87,98	1	9,38	-9	-84,42
8	10,80	116,64	2	21,60	-6	-64,80
9	12,18	148,35	3	36,54	-1	-12,18
10	13,44	180,63	4	53,76	6	80,64
11	14,73	216,97	5	73,65	15	220,95
Сумма	84,62	890,64		162,24		-18,52

В данном примере $n = 11$, поэтому многочлен Чебышева $P_1(x) = x - \frac{n+1}{2} = x - 6$. Подставляя вместо $x_i = 1, 2, \dots, 11$, находим все значения $P_1(i)$ и заносим их в графу 4 табл.5.9.

Определяем коэффициенты уравнения регрессии первого порядка:

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{84,62}{11} = 7,69;$$

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i P_1(x_i)}{\sum_{i=1}^n P_1^2(x_i)}.$$

Числитель $\sum y_i P_1(x_i)$ представляет собой сумму графы 5 таблицы. По сокращенной формуле

$$\sum_{i=1}^n P_1^2(x_i) = \frac{n(n^2-1)}{12} = \frac{11/11^2-1/1}{12} = 110$$

$$\text{находим } \alpha_1 = \frac{162,24}{110} = 1,47.$$

Таким образом, уравнение регрессии первого порядка имеет вид $y = 7,69 + 1,47 / Z - 6 /$.

Для определения дисперсии D_1 , вычисляем

$$S_0 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = 890,64 - \frac{84,62^2}{11} = 239,68;$$

$$S_1 = S_0 - \alpha_1^2 \sum_{i=1}^n P_1^2(x_i) = 239,68 - 1,47^2 \cdot 110 = 1,98,$$

$$\text{откуда } D_1 = \frac{S_1}{n-1-1} = \frac{1,98}{9} = 0,22.$$

Рассчитываем коэффициенты уравнения регрессии второго порядка:

$$P_2(x_i) = x^2 - (n+1)x + \frac{(n+1)(n+2)}{6} = x^2 - 12x + 26.$$

Находим значения $P_2(x_i)$, приведенные в графике 6 табл.5.9.

В графике 7 поместим $y_i P_2(x_i)$.

По сокращенной формуле находим

$$\sum_{i=1}^n P_2(x_i) = \frac{n(n^2-1)(n^2-4)}{18} = \frac{11/11^2-1/1/11^2-4/1}{180} = 858.$$

Определяем коэффициент

$$\alpha_2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i P_2(x_i)}{\sum_{i=1}^n P_2^2(x_i)} = \frac{-18,52}{858} = -0,02.$$

Тогда уравнение второго порядка будет иметь вид

$$y = 7,69 + 1,47 /z - 6/ - 0,02 /z^2 - 12z + 26/.$$

Вычисляем дисперсию

$$D_2 = \frac{S_e}{n-3} = \frac{S_e - \alpha_2^2 \sum_{i=1}^n P_i^2(x_i)}{n-3} = \frac{1,98 - 0,02^2 \cdot 858}{11-3} = \frac{1,64}{8} = 0,20.$$

Проверим, является ли уравнение второго порядка существенно лучшим приближением регрессии по сравнению с уравнением первого порядка. Для этого сравним по критерию Фишера дисперсию D_1 со степенью свободы

$V_1 = 9$ и дисперсию D_2 , имеющую степень свободы $V_2 = 8$. По табл. П.1.6 находим $F_{0,95/9;8} \approx 3,4$. В данном случае

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{0,22}{0,20} = 1,1 < 3,4.$$

Следовательно, уравнение второго порядка не является существенным уточнением первоначального уравнения первого порядка и нужно остановиться на регрессии первого порядка.

Окончательный вид уравнения регрессии

$$y = 7,69 + 1,47 /z - 6/.$$

Сделав обратную замену z в y на t и E , запишем

$$E - 11,270 = 7,69 + 1,47 \frac{t - 600}{100} - 6/$$

или после преобразований

$$E = 1,32 + 0,0147t.$$

Применение микрокалькуляторов существенно упрощает определение коэффициентов уравнения регрессии и сокращает затраты времени на расчеты. Приведем программу вычисления коэффициентов α и β линейного приближения методом наименьших квадратов:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x$$

П1	П0	0	П4	П5	П6	П7	ИП1	ИП0	-
I	+	C/P	П2	C/P	П3	ИП6	+	П6	ИП2
ИП4	+	П4	ИП2	Fx^2	ИП5	+	П5	ИП2	ИП3
x	ИП7	+	П7	FLO	07	ИП4	Fx^2	ИП1	ИП5
x	-	П8	ИП4	ИП6	x	ИП1	ИП7	x	-
ИП8	+	ПВ	C/P	ИП6	ИП8	ИП4	x	-	ИП1
+	ПA	C/P							

Коэффициенты линейного уравнения

$$\alpha_1 = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2};$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{n} \left(\sum y_i - \alpha_1 \sum x_i \right). \quad /5.57/$$

В первой части программы по циклу $FLO 100...36/$ считают суммы $x_i/P4/$, $x_i^2/P5/$, $y_i/P6/$ и $x_i y_i/P7/$. Далее по формулам /5.57/ рассчитывают коэффициенты $\alpha_1/P8/$ и $\alpha_0/P9/$. Исходные данные вводят в регистр x в следующем порядке: $n; x_1; y_1; x_2; y_2; \dots; x_n; y_n$. После ввода последней цифры на индикаторе высвечивается значение коэффициента α_1 , а после нажатия клавиши С/П – значение коэффициента α_0 .

В качестве примера рассчитаем по указанной программе зависимость ЭДС вольфрам-никелевой термопары от температуры по ранее приведенным данным: $n = 11$; $x_1 = 700$; $y_1 = 11,27$; $x_2 = 800$; $y_2 = 12,94$, ..., $x_{11} = 1700$; $y_{11} = 26,005$. Получим $y = 1,26755 + 1,4755 \cdot 10^{-2}x$, где x – температура, $^{\circ}\text{C}$; y – ЭДС, мВ.

Время ввода одной пары x_i и y_i 15...20 с, общее время счета всей выборки около 4,5 мин, а с учетом ввода программы в микрокалькулятор – 10...12 мин.

§ 7. Корреляционный анализ

Важной практической задачей, решаемой методами математической статистики, является оценка тесноты связи между случайными величинами.

При функциональной связи между двумя переменными, выражющейся функцией $y = f(x)$, в зависимости от вида функции каждому значению аргумента x соответствует одно вполне определенное значение функции y . При изучении взаимного влияния или связи случайных величин наблюдается иной характер связи. Ее особенность состоит в том, что одному значению переменной x может соответствовать некоторая совокупность значений другой переменной y . В этом случае связь в отличие от функциональной имеет статистический характер и называется корреляционной. Последняя занимает промежуточное положение между строгой функциональной связью и полным ее отсутствием между переменными.

Если результаты определения какого-либо параметра процесса и влияющих на него переменных факторов представить в виде пар $x_1 y_1; x_2 y_2; \dots; x_n y_n$ и соответствующие им точки построить в координатах $y-x$, то получим корреляционное поле /рис.5.10/. Расположение точек на поле

в общем случае подчиняется определенной зависимости. Если известно, что связь между исследуемыми случайными величинами линейна или на корреляционном поле точки группируются вдоль прямой линии, то мерой тесноты связи между x и y является коэффициент корреляции

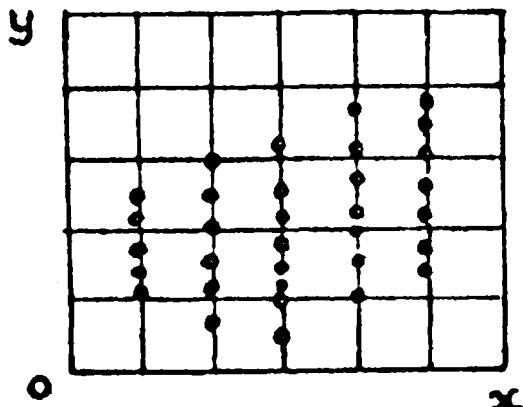


Рис. 5.10. Корреляционное поле

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}, \quad /5.58/$$

где σ_x , σ_y – среднеквадратичное отклонение соответственно x и y от средних \bar{x} и \bar{y} ;

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2}; \quad /5.59/$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2}. \quad /5.60/$$

С учетом /5.59/ и /5.60/ выражение для определения коэффициента корреляции может быть представлено в виде

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}. \quad /5.61/$$

Коэффициент корреляции указывает на тесноту связи между переменными, а знак – на характер влияния. Значения коэффициента корреляции могут находиться в пределах $-1 \leq r \leq +1$. Если $r < 0$, увеличение x вызывает уменьшение y ; при $r > 0$ наблюдается обратная закономерность; если $|r| = 1$, связь функциональна; если $r = 0$, корреляционной связи между x и y нет или она нелинейна. Обычно тесноту связи считают удовлетворительной при $|r| \geq 0,5$. Следует учитывать, что высокая корреляционная связь между факторами не всегда свидетельствует об их причинной зависимости. Возможен случай "ложной" корреляции, когда корреляционная связь между двумя факторами объясняется влиянием какого-либо третьего неучтенного фактора.

При малом числе парных измерений $/n < 50/$ достоверность связи оценивается расчетом дисперсии коэффициента корреляции

$$\sigma_r^2 = \frac{1 - r^2}{(n-1)}. \quad /5.62/$$

Связь считается достоверной с доверительной вероятностью 0,95, если отношение

$$\frac{z}{\sigma_z} \geq 3. \quad /5.63/$$

При изучении связи между тремя переменными две из них принимают за независимые переменные x_1 и x_2 , а третью - за функцию y . В этом случае уравнение регрессии будет иметь вид

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2. \quad /5.64/$$

Коэффициенты регрессии

$$a_1 = \frac{r_{yx_1} - r_{yx_2} r_{x_1 x_2}}{1 - r_{x_1 x_2}^2} \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_1}}; \quad /5.65/$$

$$a_2 = \frac{r_{yx_2} - r_{yx_1} r_{x_1 x_2}}{1 - r_{x_1 x_2}^2} \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_2}}; \quad /5.66/$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x}_1 - a_2 \bar{x}_2, \quad /5.67/$$

где r_{yx_1} , r_{yx_2} , $r_{x_1 x_2}$ - коэффициент корреляции между факторами соответственно y и x_1 , y и x_2 , x_1 и x_2 ; σ_y - среднеквадратичное отклонение y ; σ_{x_1} , σ_{x_2} - среднеквадратичные отклонения факторов x_1 и x_2 .

Если количество переменных равно трем и более, теснота линейной связи оценивается с помощью коэффициента множественной корреляции R , всегда имеющего положительное значение $0 < R < 1$, которое для трех переменных может быть вычислено по одной из формул:

$$R_{yx_1 x_2} = \sqrt{\frac{r_{yx_1}^2 + r_{yx_2}^2 - 2r_{yx_1} r_{yx_2} r_{x_1 x_2}}{1 - r_{x_1 x_2}^2}}; \quad /5.68/$$

$$R_{yx_1 x_2} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum [a_1(x_1 - \bar{x}_1) + a_2(x_2 - \bar{x}_2)]^2}{\sigma_y^2}}. \quad /5.69/$$

При исследовании зависимостей методами множественной корреляции иногда возникает необходимость выявить влияние какой-либо одной переменной на показатели процесса. Такая оценка при закреплении значений остальных факторов на постоянном уровне может осуществляться с помощью частных коэффициентов корреляции r' . Для двух факторов эти коэффициенты определяются из выражений

$$z'_{yx_1x_2} = \frac{z_{yx_1} - z_{yx_2} z_{x_1x_2}}{\sqrt{(1-z_{yx_2}^2)(1-z_{x_1x_2}^2)}}, \quad /5.70/$$

$$z'_{yx_2x_1} = \frac{z_{yx_2} - z_{yx_1} z_{x_1x_2}}{\sqrt{(1-z_{yx_1}^2)(1-z_{x_1x_2}^2)}}. \quad /5.71/$$

Точка между индексами частного коэффициента корреляции отделяет фактор или группу факторов, которые исключаются из корреляционной зависимости между двумя первыми, стоящими слева от точки.

При изучении множественной корреляционной связи ограничиваются допущением линейной связи между исследуемыми факторами. Уравнение множественной корреляции для трех переменных геометрически определяет положение некоторой плоскости в трехмерном пространстве переменных x_1 , x_2 и y . Уравнения множественной корреляции с числом факторов более двух из-за своей грудоемкости обычно рассчитываются по стандартным программам с помощью ЭВМ. Линейность связи и ряд других причин ограничивают область применения корреляционного анализа. Поэтому на практике чаще применяют регрессионный анализ и влияние факторов оценивают по коэффициентам регрессии.

При нелинейной корреляции между двумя переменными обычно используют уравнение в виде многочлена

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2^2 + a_3 x_3 + \dots + a_K x_K. \quad /5.72/$$

Если степень K многочлена /5.72/ известна, то коэффициенты $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_K$ определяют методами множественной регрессии. В общем случае тесноту нелинейной связи зависимой переменной y и независимых x_i , $i = 1, 2, 3, \dots, K$ оценивают корреляционным отношением

$$\gamma = \frac{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}, \quad /5.73/$$

где \bar{y}_i - среднее значение фактора y , соответствующее группе или интервалу значений фактора x ; \bar{y} - общая средняя фактора y ; y - значение каждого фактора в группе.

Значения корреляционного отношения находятся в пределах $0 \leq \gamma \leq 1$. Корреляционное отношение может служить мерой тесноты как линейной, так и нелинейной связи, однако в последнем случае оно не позволяет установить, насколько близко опытные точки расположены к кривой регрессии - параболе, гиперболе и т.д.

В некоторых случаях для приведения нелинейной корреляционной зависимости к более простому линейному виду удобнее рассматривать не

сами переменные, а некоторые их функции, например, обратные величины, логарифмы и т.п. Это так называемая функциональная корреляция. Например, нелинейное корреляционное уравнение вида

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} x_3^{a_3} \dots x_k^{a_k} \quad /5.74/$$

логарифмированием можно преобразовать в линейное по параметрам

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x_1 + a_2 \ln x_2 + \dots + a_k \ln x_k. \quad /5.75/$$

Такое преобразование позволяет для нахождения коэффициентов регрессии и оценки тесноты связи воспользоваться обычным линейным методом наименьших квадратов с учетом определенных особенностей "линейных" членов уравнений.

Пример 5.4. Методом корреляционного анализа определить коэффициенты линейного уравнения, тесноту и достоверность связи между длиной электрической дуги L , мм, и напряжением на дуге E , если в опыте были получены данные, приведенные в табл.5.10. Обозначим длину дуги x , а напряжение на дуге y .

Таблица 5.10

L , мм	10,0	14,3	20,0	27,0	34,1	40
E , В	58	65	75	90	100	110

Заносим исходные значения x и y и промежуточные расчетные величины в сводную табл.5.11.

Таблица 5.11

№ п/п	x	y	xy	x^2	y^2
1	10,0	58	580	100	3364
2	14,3	65	929,5	204,49	4225
3	20,0	75	1500	400	5625
4	27,0	90	2430	729	8100
5	34,1	100	3410	1162,81	10000
6	40,0	110	4400	1600	12100
Σ	145,4	498	13249,5	4196,3	43414

Определяем коэффициенты в линейном уравнении регрессии по выведенным ранее формулам:

$$\alpha_1 = \frac{6 \cdot 13249,5 - 145,4 \cdot 498}{6 \cdot 4196,3 - 145,4} = \frac{7087,8}{4036,4} = 1,75;$$

$$\alpha_0 = \frac{498}{6} - 1,75 \cdot \frac{145,4}{6} = 83 - 42,4 = 40,6.$$

Таким образом, уравнение линейной связи имеет вид $E = 40,6 + 1,75L$. Вычисляем коэффициент корреляции:

$$Z = \frac{6 \cdot 13249,5 - 145,4 \cdot 498}{\sqrt{6 \cdot 4196,3 - 145,4^2} / \sqrt{6 \cdot 43414 - 498^2}} = \frac{7087,8}{\sqrt{7092,9}} = 0,99.$$

Полученное значение Z , близкое к единице, свидетельствует о практическом линейном характере связи. Поскольку число измерений невелико, проверим достоверность связи, рассчитав дисперсию коэффициента корреляции:

$$\sigma_Z = \frac{1 - 0,99^2}{6-1} = 0,009; \quad \frac{Z}{\sigma_Z} = \frac{0,99}{0,009} = 110 \gg 3.$$

Видно, что связь достоверна.

Приведем программу расчета парного коэффициента корреляции по уравнению

$$Z = \frac{\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2} \sqrt{\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2}}. \quad 5.76/$$

ПО	П1	ИП9	С/П	П8	ИП7	+	П7	ИП8	Fx^2
ИП6	+	П6	ИП8	С/П	П9	ИП5	+	П5	ИП9
Fx^2	ИП4	+	П4	ИП8	ИП9	x	ИП3	+	П3
FLO	03	ИП6	ИП7	Fx^2	ИП1	+	-	Ff	ПВ
ИП4	ИП5	Fx^2	ИП1	+	-	Ff	ПД	x	П2
ИП3	ИП7	ИП5	x	ИП1	+	-	ИП2	+	П2
С/П	Fx^2	I	-	I-1	ИП1	Ff	+	П0	С/П
ИП7	ИП1	+	ПА	С/П	ИПВ	ИП1	Ff	+	ПВ
С/П	ИП5	ИП1	+	ПС	С/П	ИПД	ИП1	Ff	+
ПД	С/П.								

В первой части программы /шаги 3-32/ по циклу FLO накапливаются суммы $x_i /P7/, x_i^2 /P8/, y_i /P5/, y_i^2 /P4/$ и $x_i y_i /P3/$. Перед началом расчета все регистры памяти Р0, I ... 9, РА, РВ, РС и РД обнуляются. Исходные данные вводят в РХ в следующем порядке: n - количество данных x_i и y_i , нажимают клавиши В/О и С/П, после чего на индикаторе высвечивается нуль. Затем вводят последовательно x_1, y_1, x_2 ,

x_1, x_2, \dots, x_n ; y_1, y_2, \dots, y_n . Время ввода одной пары x и y составляет 12...15 с. После ввода последнего числа (y_n) ЭВМ рассчитывает коэффициент корреляции r , который сохраняется в Р2. При следующем пуске (С/П) рассчитывается среднеквадратичное отклонение коэффициента корреляции σ_r , которое будет записано в Р0, далее - $\bar{x}/PA/, \sigma_x/PB/, \bar{y}/PC/$ и $\sigma_y/PD/$. Каждое из указанных значений вычисляется после нажатия клавиши С/П и затем хранится в перечисленных регистрах памяти.

На основании полученных данных можно записать уравнение парной корреляции в виде

$$y - \bar{y} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}) \quad /5.77/$$

и оценить достоверность полученной зависимости по /5.63/.

По этой программе выполнен расчет для массива данных, приведенных в табл.5.10. Получили: $r = 0,9860594 \cdot 10^{-1}$; $\sigma_r = 1,13746 \cdot 10^{-3}$; $\bar{x} = 24,23$; $\sigma_x = 10,589$; $\bar{y} = 83,0$; $\sigma_y = 18,62$.

$$y - 83 = 0,999 \cdot \frac{18,62}{10,589} /x - 24,23/;$$

$$y = 1,76x + 40,4;$$

$$\frac{r}{\sigma_r} = \frac{0,999}{1,1375 \cdot 10^{-3}} = 878,2 \gg 3.$$

Пример 5.5. Методом парной корреляции определить по экспериментальным данным /табл.5.12/ зависимость скорости окисления углерода в 400-тонной мартеновской печи от интенсивности продувки металла кислородом.

Таблица 5.12

№ п/п	Расход кислоро- да x , $m^3/ч$	Скорость окисления углерода $y, \%/ч$	№ п/п	$x, m^3/ч$	$y, \%/ч$	№ п/п	$x, m^3/ч$	$y, \%/ч$
1	0	0,30	8.	1500	0,47	15	2200	0,57
2	0	0,27	9.	1800	0,48	16	2200	0,59
3	0	0,22	10	1900	0,52	17	2300	0,54
4	0	0,26	11	2000	0,54	18	2400	0,66
5	0	0,32	12	2000	0,50	19	2900	0,68
6	1100	0,36	13	2100	0,45	20	3100	0,62
7	1200	0,42	14	2100	0,54			

В результате расчетов получили: $\bar{x} = 0,956$; $\sigma_x = 0,0192$; $\bar{y} = 1540$; $\sigma_y = 997,2$; $\bar{y} = 0,466$; $\sigma_y = 0,134$, откуда $y - 0,466 = 0,956 \cdot \frac{0,134}{997,2} / x - 1540 /$; $y = 1,28 \cdot 10^{-4} x + 0,269$ и значимость коэффициента корреляции $r = \frac{0,956}{1,92 \cdot 10^{-2}} = 49,79$, что заметно превышает табличное значение при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и свидетельствует о достоверности полученной зависимости.

§ 8. Дисперсионный анализ

В металлургических исследованиях, особенно проводимых в промышленных условиях, часто требуется выявить основные факторы, влияющие на процесс, и отсеять факторы, влияние которых незначительно. Эта задача решается с помощью дисперсионного анализа.

В дисперсионном анализе в качестве показателя влияния изучаемого фактора A принимают дисперсию этого фактора S_A^2 . Общая дисперсия наблюдений S^2 складывается из дисперсии S_A^2 , обусловленной влиянием фактора A , и остаточной дисперсии S_o^2 , связанной с фактором случайности. Для случая однофакторного дисперсионного анализа

$$S_A^2 = \frac{n}{K-1} \sum_{i=1}^K (\bar{x}_i - \bar{x})^2, \quad /5.78/$$

где n – число повторных наблюдений на каждом уровне изменения фактора A ; K – число уровней изменения фактора A ; \bar{x}_i , \bar{x} – среднее значение наблюдений соответственно на i -м и всех уровнях.

Дисперсия случайности оценивается по повторным наблюдениям на каждом уровне:

$$S_o^2 = \frac{1}{K(n-1)} \left[\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \right)^2 \right], \quad /5.79/$$

где x_{ij} – текущее значение выходного параметра процесса.

Для того чтобы влияние фактора A было значимым, необходимо и достаточно, чтобы дисперсия S_A^2 значимо отличалась от дисперсии S_o^2 . Дисперсии S_A^2 и S_o^2 сравнивают по критерию Фишера, т.е. влияние фактора A признается значимым на уровне значимости ρ , если

$$\frac{S_A^2}{S_o^2} > F_{1-\rho}, \quad /5.80/$$

где значение F -распределения выбирают из таблиц для степеней свободы $v_1 = K-1$ и $v_2 = K(n-1)$.

Пример 5.6. Методом дисперсионного анализа исследовать влияние вида противопригарных обмазок мульд конвейерной разливочной машины при разливке ферросилиция на газонасыщенность слитков этого сплава. Опробовались следующие варианты обмазок: водный раствор извести /"известковое молоко"/ A_1 , водный раствор соды A_2 , водный раствор магнезитовой или шамотной пыли A_3 , безводная обмазка с подсыпкой на дно мульды мелочи разливающего сплава фракции менее 3 мм A_4 .

Результаты определения газонасыщенности сплава приведены в сводной табл.5.13.

Таблица 5.13
[см³/100 г]

Номер опыта	Номер противопригарных обмазок			
	A_1	A_2	A_3	A_4
1	8,45	6,85	7,60	3,60
2	9,00	7,15	7,45	4,20
3	8,75	7,00	7,65	3,85
4	9,10	6,65	7,35	4,00
5	8,85	6,80	7,15	3,40
6	8,60	6,95	7,50	3,20
7	8,50	7,00	7,70	3,75
Сумма	61,25	48,40	52,40	26,00

Находим сумму квадратов всех опытов:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{\kappa} \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^7 A_{ij}^2 = 1360,8725.$$

Определяем сумму квадратов итогов по графам, деленную на число параллельных опытов n :

$$Q_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\kappa} x_i^2 = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^4 A_{i\Sigma}^2 = 1359,4117.$$

Находим квадрат общего итога, деленный на число всех опытов:

$$Q_3 = \frac{1}{\kappa n} \left(\sum_{i=1}^{\kappa} x_i \right)^2 = \frac{1}{4 \cdot 7} \left(\sum_{i=1}^4 A_{i\Sigma} \right)^2 = 1262,9572.$$

Вычисляем дисперсии

$$S_o^2 = \frac{Q_1 - Q_2}{K(n-1)} = \frac{1360,8725 - 1359,4117}{4 \cdot 7 - 1} = 0,06;$$

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_3}{K-1} = \frac{1359,4117 - 1262,9572}{4 - 1} = 32,15$$

и сравниваем их по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_A^2}{S_o^2} = \frac{32,15}{0,06} = 535,83.$$

По табл.П.1.6 находим $F_{0,95}(3;24) = 3,0$. Видим, что $F_p > 3,0$, поэтому различие видов противопригарных обмазок следует признать значимым. Таким образом, замена применяемой противопригарной обмазки /"известкового молока"/ другими, опробованными в работе, несомненно эффективнее с точки зрения снижения газонасыщенности сплава. Окончательно вид обмазки может быть выбран с учетом экономических соображений.

Дисперсионный анализ особенно эффективен при одновременном изучении влияния нескольких факторов. При классическом методе исследований варьируют лишь один фактор, а остальные оставляют неизменными. В связи с этим затрачивается много времени, так как для каждого фактора проводится своя серия измерений, не используемых в дальнейшем при изучении других факторов. К тому же нельзя изучать взаимодействие факторов при их одновременном изменении.

Всех этих недостатков лишен дисперсионный анализ, в процессе которого каждое измерение служит для одновременной оценки всех факторов и их взаимодействий. При этом можно часто не делать параллельных измерений, ограничиваясь лишь одним измерением для каждого сочетания уровней изучаемых факторов.

Многофакторный анализ достаточно сложен, поэтому ограничимся двухфакторным дисперсионным анализом.

Пусть изучается одновременно влияние двух факторов A и B на уровнях A_1, A_2, \dots, A_K и B_1, B_2, \dots, B_n . Результаты измерений занесем в табл.5.14.

В табл.5.14 приняты такие обозначения: X_i — итоги данных по графикам; X'_j — по строкам; \bar{X}_i и \bar{X}'_j — средние по графикам и строкам, т.е. $\bar{X}_i = X_i/p$; $\bar{X}'_j = X'_j/k$.

На рассеивание средних по строкам или по столбцам влияет лишь один из факторов A и B , так как все уровни второго фактора усреднены. К тому же на всех рассеиваниях оказывается влияние фактора случай-

ности с дисперсией $\frac{\sigma^2}{n}$ для \bar{x}_i , и $\frac{\sigma^2}{K}$ для \bar{x}_j . Исходя из этого можно записать

$$\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 \approx \sigma_A^2 + \frac{\sigma^2}{n};$$

15.81/

$$\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2 \approx \sigma_B^2 + \frac{\sigma^2}{K},$$

где $\bar{\bar{x}}$ - среднее всех данных таблицы.

Таблица 5.14

B	A				Итого
	A ₁	A ₂	...	A _K	
B ₁	x ₁₁	x ₂₁	...	x _{K1}	x' ₁
B ₂	x ₁₂	x ₂₂	...	x _{K2}	x' ₂
...
B _n	x _{1n}	x _{2n}	...	x _{Kn}	x' _n
Итоги	X ₁	X ₂	...	X _K	

Получившиеся равенства позволяют оценить дисперсии факторов A и B , если известна общая дисперсия σ^2 , которую можно оценить без параллельных измерений, сравнивая рассеивания средних и самих измерений:

$$\sigma^2 \approx \frac{1}{(K-1)(n-1)} \left[\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i)^2 - K \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2 \right]. \quad 15.82/$$

Обозначим эту дисперсию S_o^2 . Кроме того, введем для дисперсий, учитывающих влияние факторов A и B , обозначения соответственно S_A^2 и S_B^2 :

$$S_A^2 = \frac{n}{K-1} \sum_{i=1}^K (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 \approx n \sigma_A^2 + S_o^2;$$

15.83/

$$S_B^2 = \frac{K}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2 \approx K \sigma_B^2 + S_o^2.$$

Для признания влияния фактора $A(B)$ значимым нужно, чтобы $S_A^2(S_B^2)$ значимо отличалось от S_o^2 . Дисперсии сравниваются по критерию Фишера, т.е. вычисляются отношения $\frac{S_A^2}{S_o^2}$ и $\frac{S_B^2}{S_o^2}$ и сравниваются с табличными значениями F -распределения.

При выбранном уровне значимости ρ влияние фактора A признается значимым, если $\frac{S_A^2}{S_o^2} > F_{1-\rho}$.

Табличное значение F -распределения выбирают для степеней свободы $\nu_1 = K - 1$ и $\nu_2 = (K - 1) / (n - 1)$. В этом случае дисперсию фактора A оценивают равенством

$$\sigma_A^2 \approx \frac{S_A^2 - S_0^2}{n}. \quad /5.84/$$

Аналогично влияние фактора B значимо, если $\frac{S_B^2}{S_0^2} > F_{1-\rho}$. Но табличное значение $F_{1-\rho}$ принимают для $\nu_1 = n - 1$ и $\nu_2 = (K - 1)(n - 1)$.

Указанная методика оценки влияния двух факторов справедлива, если эти факторы независимы; если между ними существует взаимодействие, то его учитывают как фактор, которому соответствует своя дисперсия σ_{AB}^2 , входящая как составная часть в дисперсию S_0^2 . Выделить ее из дисперсии S_0^2 невозможно без параллельных измерений. Если при каждом сочетании уровней факторов A и B проводить m параллельных измерений, то дисперсия их взаимодействия оценивается по формуле

$$\sigma_{AB}^2 \approx S_0^2 - S/m, \quad /5.85/$$

где S^2 — средневзвешенная дисперсия по всем сериям;

$$S^2 = \frac{1}{nK} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n S_{ij}^2. \quad /5.86/$$

Для проверки значимости эффекта взаимодействия факторов A и B рассчитывают отношение mS_{AB}^2/S^2 и сравнивают его с табличным значением $F_{1-\rho}$ при степенях свободы $\nu_1 = (K - 1)(n - 1)$ и $\nu_2 = mK(n - 1)$.

Пример 5.7. Методом дисперсионного анализа оценить влияние режима раскисления стали, опробованного на трех металлургических заводах B_1, B_2, B_3 . На каждом заводе отобраны одни и те же варианты состава раскислительных смесей A_1, A_2, A_3 . По каждому варианту проведены по три опытные плавки. В качестве основного показателя сравнительных опытов принята ударная вязкость стали.

Получаем "фактор раскисления" A и "фактор завода" B . "Фактор завода" требует учета, так как особенности металлошлаки на каждом заводе могут оказать существенное влияние на качество готового металла.

Составим полную таблицу исходных данных /табл.5.15/.

Определим сумму квадратов всех опытных плавок $Q_S = 23205$.

Для дальнейших расчетов используем только средние данные опытных плавок по каждому варианту на отдельных заводах, сведенные в табл.5.16.

Таблица 5.15

B	A								
	A ₁			A ₂			A ₃		
B ₁	23;	24;	24	32;	35;	34	25;	26;	28
B ₂	25;	27;	28	35;	36;	37	28;	29;	30
B ₃	24;	25;	27	33;	35;	34	27;	26;	26

Таблица 5.16

B	A			Итоги
	A ₁	A ₂	A ₃	
B ₁	23,67	33,67	26,33	83,67
B ₂	26,67	36,00	29,00	91,67
B ₃	25,33	34,00	26,33	85,66
Итоги	75,67	103,67	81,66	261,00

В нижней строке табл.5.16 записаны итоги по графикам X_i , а в правой графе – итоги по строкам X'_j . В самом нижнем правом углу записана общая сумма всех элементов:

$$\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N x_{ij} = \sum_{i=1}^K X_i = \sum_{j=1}^N X'_j.$$

В данном примере $K = 3$, $N = 3$.

Полученную таблицу из средних обрабатываем по правилам двухфакторного дисперсионного анализа без повторений. Для этого находим

$$O_1 = 23,67^2 + 33,67^2 + 26,33^2 + 26,67^2 + \dots + 26,33^2 = \\ = 7726,3734;$$

$$O_2 = \frac{76,67^2 + 103,67^2 + 81,66^2}{3} = 7713,9236;$$

$$O_3 = \frac{83,67^2 + 91,67^2 + 85,66^2}{3} = 7580,5473;$$

$$O_4 = \frac{261,00^2}{3 \cdot 3} = 7569.$$

Рассчитываем дисперсию воспроизводимости

$$S^2 = \frac{23205 - 3 \cdot 7726,3734}{3 \cdot 3 \cdot 2} = 1,438$$

и совместную дисперсию воспроизводимости и взаимодействия

$$S_o^2 = \frac{7726,3784 + 7569 - 7713,9236 - 7580,5473}{2 \cdot 3} = 0,15.$$

Чтобы проверить значимость эффекта взаимодействия, сравним дисперсии $ms_o^2 = 3 \cdot 0,15 = 0,45$ и $S^2 = 1,438$ по критерию Фишера. Отношение $(ms_o^2/S^2) = \frac{0,45}{1,438} = 0,31$.

Со степенями свободы $\nu_1 = 2 \cdot 2 = 4$, $\nu_2 = 3 \cdot 3 \cdot 2 = 18$ табличное значение $F_{0,95} = 2,9$. Таким образом, эффект взаимодействия факторов "раскисления" и "завода" оказался незначительным.

Теперь оценим влияние факторов "раскисления" A и "завода" B в отдельности. Для этого находим

$$S_A^2 = \frac{7713,9236 - 7569}{2} = 72,46; S_B^2 = \frac{7580,5473 - 7569}{3} = 3,85.$$

Сравнивая по критерию Фишера дисперсии S_A^2 и S_o^2 , получаем

$$\frac{S_A^2}{S_o^2} = \frac{72,46}{0,15} = 483,0,$$

в то время как со степенями свободы $\nu_1 = 2$, $\nu_2 = 4$ табличное значение $F_{0,95} = 6,9$. Это значит, что влияние фактора "раскисления" значимо.

Аналогично проверяем для фактора "завода"

$$\frac{S_B^2}{S_o^2} = \frac{3,85}{0,15} = 25,67 > 6,9.$$

Таким образом, фактор "завода" также значим. Следовательно, влияние режима раскисления на ударную вязкость статистически значимо, хотя эффект раскисления зависит и от местных условий /завода/.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определения функции распределения вероятностей и плотности распределения вероятностей.
2. Приведите свойства математического ожидания.
3. Напишите уравнение для расчета дисперсии.
4. Что называется среднеквадратичным отклонением?
5. Укажите свойства дисперсии.

6. Охарактеризуйте закон нормального распределения.
7. Приведите последовательность оценки статистической гипотезы по χ^2 критерию.
8. Сформулируйте определение эмпирической и теоретической линий регрессии.
9. В чем суть метода графического определения уравнения, описываемого эмпирические данные?
10. Опишите принцип и последовательность исключения грубых ошибок эксперимента.
11. В чем сущность метода наименьших квадратов?
12. Основная задача анализа данных эксперимента.
13. Напишите формулы для расчетов коэффициентов регрессии линейного уравнения.
14. Принципиальное различие между функциональной и корреляционной видами связи. Укажите назначение корреляционного анализа.
15. Напишите формулу для расчета коэффициента корреляции. Что определяют величина и знак коэффициента корреляции?
16. В каком случае теснота линейной связи определяется с помощью коэффициента множественной корреляции? Укажите величину, оценивающую тесноту нелинейной связи.
17. Назначение дисперсионного анализа экспериментальных данных. В каком случае влияние фактора считается значимым при дисперсионном анализе?
18. Как оценивается достоверность коэффициентов уравнения регрессии?
19. Как проверяется адекватность теоретической модели экспериментальным данным?

Глава 6. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Современное планирование эксперимента возникло в 20-е годы 19 ст. благодаря трудам Р.Фишера. В развитии теории принимали участие многие видные ученые, среди которых можно выделить Дж.Бокса, К.Уилсона и др.

В нашей стране планирование эксперимента развивается с 1960 г. под руководством В.В.Налимова.

§ I. Цели, задачи и возможности планирования эксперимента

Планирование эксперимента заключается в выборе количества и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Основная цель планирования исследований – получить максимум достоверной информации при минимально возможных затратах на экспериментирование. Планирование эксперимента позволяет определять методику, количество и порядок проведения опытов, а также решать следующие практические задачи: отсеивать факторы при исследовании процессов, оценивать константы известной модели, отыскивать оптимум процесса или технологии, описывать неизвестный процесс математической моделью /полиномом/ и систематизировать экспериментальный материал. Планирование особенно эффективно при исследовании так называемых "плохо организованных систем"^{*}, к которым можно отнести большинство металлургических процессов.

Наиболее полная форма планирования показана на рис.6.1. Все операции по пп.1–6 выполнять не обязательно. Если необходимо найти экстремум процесса или оптимальную технологию, достаточно ограничиться пп.1–4 схемы, а если известны все факторы, влияющие на исследуемый процесс, то для планирования достаточны пп.1; 2 и 4 схемы. Если нужно описать исследуемый процесс математической моделью для использования в алгоритмах или для систематизации большого количества исследований, можно воспользоваться пп.1–3, 5 схемы, либо пп.1, 2, 5 при заранее известных факторах. Наконец, если необходимо исследовать процесс, математически описать его и сделать технологические выводы, надо построить планирование по пп.1–3, 5, 6, либо по пп. 1, 2, 5, 6.

Математическое планирование базируется на активном эксперименте, обладающем по сравнению с пассивным тем преимуществом, что он позволяет рационально распределить опытные точки в факторном пространстве, обеспечив этим высокую надежность конечных результатов при сравнительно малом количестве опытов. Под факторным подразумевается абстрактное пространство, по координатным осям которого откладываются значения изменяемых факторов. Пассивное экспериментирование требует значительного увеличения количества опытов, но даже в этом случае надежность конечных зависимостей не всегда бывает высокой из-за случайного и нерационального распределения опытных точек в факторном пространстве.

В последнее время разрабатываются методы планирования промышленного эксперимента, которые с достаточной достоверностью можно применять к исследованию и описанию работы промышленного агрегата в реальных условиях производства.

* Системы, имеющие много разнородных факторов, задающих различные по своей природе, но тесно связанные друг с другом процессы.

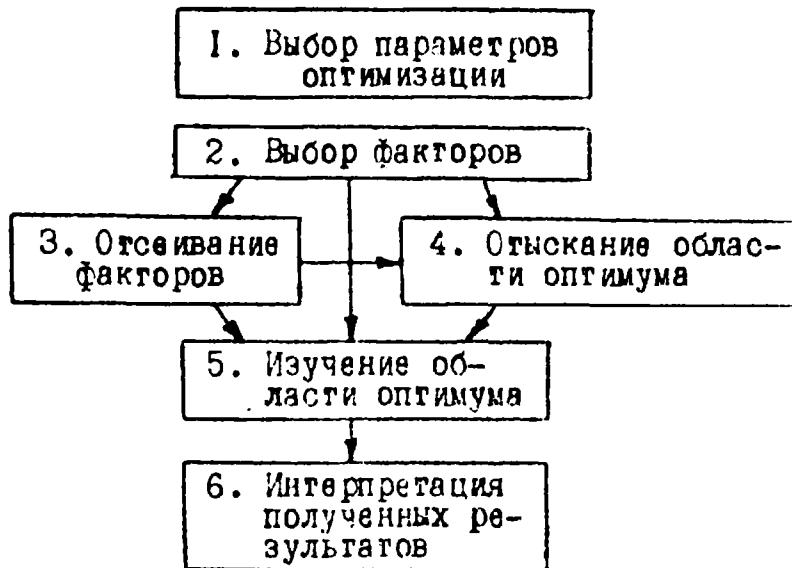


Рис.6.1. Схема планирования и проведения эксперимента

§ 2. Факторы и параметры оптимизации

Планом эксперимента называется фиксированная последовательность опытов с определенными уровнями факторов:^{*}

$$X = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nK} \end{vmatrix}, \quad /6.1/$$

где x_{ij} , x_{ij} , ... x_{nK} - уровни факторов; n - количество опытов; K - количество факторов.

Фактором называется независимая переменная качественная или количественная величина, влияющая на исследуемый процесс. Количественные факторы можно выразить числом, качественные - нельзя. Примером качественного фактора могут служить система загрузки /прямая, обратная и др./ в доменном производстве при исследовании распределения шихты; вид топлива /бурый уголь, антрацитовый штыб и др./ в агломерационном производстве и пр. Качественные факторы неудобны в планировании, так как увеличивают общее количество опытов. Чтобы этого избежать, их необходимо переводить в количественные.

К факторам предъявляются определенные требования: отсутствие связи /корреляции/ между ними /по крайней мере, линейной/; совместимость /комбинация факторов не должна приводить к порче оборудования, взрывам и пр./; возможность достаточно точного измерения и поддержания на необходимом уровне.

* В данном случае под опытом понимается состояние исследуемого объекта или процесса при фиксированных уровнях всех факторов.

При выборе желательно перечислить все явные и подозреваемые факторы, влияющие на процесс, определяя их путем обзора литературы, рассмотрения физической сущности процесса, логических рассуждений и опроса специалистов.

После выбора факторов необходимо указать области их определения /минимально и максимально возможные значения/, ограниченные обычно техническими возможностями эксперимента и технологической целесообразностью.

Каждый фактор в опыте может принимать одно из нескольких значений – уровней. Для того чтобы можно было воспользоваться стандартными планами, приводимыми в специальной литературе [11; 23], необходимо уровни факторов закодировать /стандартизовать/ по формуле

$$x = (x_n - \bar{x}_n) / J, \quad /6.2/$$

где x , x_n – кодированное и натуральное значения фактора; \bar{x}_n – натуральное значение фактора на среднем /нулевом/ уровне; J – интервал варьирования, равный полуразности натуральных значений фактора на верхнем и нижнем уровнях.

При кодировании обычно верхний уровень обозначают +1, нижний -1, средний /нулевой/ 0. Для описания процесса или объекта исследования пользуются представлением о кибернетической системе. Воздействие факторов x на исследуемый объект /"черный ящик"/ вызывает его определенный отклик, обозначаемый y и называемый параметром оптимизации.

Под параметром оптимизации подразумевается количественно определенная характеристика исследуемого процесса /объекта/, наиболее полно отражающая его сущность и эффективность. "Черный ящик" преобразует значения факторов в значения параметров оптимизации, причем механизм преобразования может быть неизвестен. Воздействуя на "черный ящик" определенным планом эксперимента и соответствующими ему параметрами оптимизации /откликами/ можно получить математическую модель, записываемую в общем виде так: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$.

Параметр оптимизации должен обладать однозначностью /каждому состоянию процесса должно соответствовать одно значение параметра/, статистической эффективностью /наименьшим разбегом повторных значений/, простотой и ясностью физического смысла, ограниченностью области определения, единогласностью. Можно применять два и более параметра оптимизации, что усложнит задачу, потребует переформулирования или оценки корреляции между ними.

Обобщенный параметр оптимизации можно определить как функцию от одних и тех же факторов. Кратко рассмотрим три способа.

I. Если для каждого из частных известно наилучшее значение Y_{ui_0} , обобщенный параметр оптимизации

$$Y_i = \sum_{u=1}^n a_u ((Y_{ui} - Y_{ui_0}) / Y_{ui_0})^2, \quad 16.3/$$

где a_u - доля /вес/ каждого частного u -го параметра оптимизации Y_{ui} в i -м опыте.

Ранжировка откликов по степени их важности /определение доли a_u / возможна с помощью экспертных оценок.

2. Получение обобщенного отклика с помощью шкалы с двумя значениями: 0 - брак, неудовлетворительное качество; 1 - годный продукт, удовлетворительное качество:

$$Y_i = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n Y_{ui}}. \quad 16.4/$$

Этот метод слишком груб, поскольку не имеет промежуточных значений.

3. Определяя обобщенный отклик с помощью функции желательности Харрингтона, весь разбег значений параметров оптимизации приводят к единой шкале от 0 до 100% и каждое u -е значение в i -м опыте Y'_{ui} переворачивают на значение шкалы желательности

$$d_{ui} = \exp(-\exp(-Y'_{ui})), \quad 16.5/$$

где d_{ui} - частные отклики параметров, переведенные в безразмерную шкалу желательности, которая имеет интервал от нуля до единицы; Y' - кодированная шкала, обычно выбирается от -2 до 6, а обобщают по формуле

$$Y_i = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n d_{ui}}. \quad 16.6/$$

Этот метод обладает значительными преимуществами перед первыми двумя.

Пример 6.1. Найти обобщенные параметры оптимизации, определяющие эффективность циклических систем загрузки, применительно к доменным печах полезного объема 2000 м³, используя функцию желательности Харрингтона.

На доменных печах была исследована эффективность различных циклических систем загрузок /табл. 6.1/. Под системой загрузки понимается порядок расположения рудных /A/ и коксовых /K/ скрапов в подаче, а также уровень засыпи. При исследовании определяли распределение газового потока по радиусу колошника, по которому рассчитывали дисперсию газовых нагрузок δ_r и определяли газопроницаемость, измеряя перепад давлений на единицу высоты слоя ΔP . Потери давления должны быть меньше, поскольку они определяют форсировку печи; дисперсия газовых нагрузок тоже должна быть минимальной, тогда использование газового потока будет максимальным.

Таблица 6.1

Режим загрузки	Параметр оптимизации		Безразмерный параметр оптимизации		Обобщенный параметр оптимизации, γ'
	b_r	ΔP , кПа/м	d_1	d_2	
1. 2ААКК↑, ЗАККА↑, 1,5 м	10,94	1,97	0,0006	0,9284	0,0236
2. 2ААКК↑, ЗКААК↑, 1,5 м	3,58	2,01	0,9878	0,8476	0,9150
3. 2ААКК↑, ЗКАКА↑, 1,5 м	3,43	1,86	0,9897	0,9918	0,9907
4. 2АККА↑, ЗКААК↑, 1,5 м	5,82	2,22	0,8931	0,0006	0,0236
5. ЗАККА↑, 2КАКА↑, 1,5 м	8,12	2,10	0,3238	0,3700	0,3462
6. ЗААКК↑, 2КАКА↑, 1,75 м	7,05	1,88	0,6793	0,9872	0,8188
7. ЗААКК↑, 2КАКА↑, 1,5 м	4,75	1,79	0,9619	1,0000	0,9809
8. 2КААК↑, ЗКАКА↑, 1,5 м	1,67	2,09	1,0000	0,4409	0,6641
9. 2ААКК↑, ЗКАКА↑, 1,75 м	2,64	2,10	0,9952	0,3700	0,6068

Построим функцию желательности Харрингтона /рис. 6.2/ по /6.5/. Ниже кодированной шкалы приведем шкалы параметров оптимизации исследуемого процесса так, чтобы минимум значений b_r и ΔP из имеющегося набора в табл. 6.1 соответствовал цифре 6 на шкале кодирования γ' , а максимум — 2.

Переведем параметры b_r и ΔP в частные отклики шкалы желательности соответственно d_1 и d_2 , пользуясь кривой Харрингтона как номограммой, и запишем их в табл. 6.1.

Определим обобщенные параметры оптимизации для каждой исследованной системы загрузки:

для первой

$$\gamma_1 = \sqrt{d_{11} d_{21}} = \sqrt{0,0006 \cdot 0,9284} = 0,0236;$$

для второй

$$\gamma_2 = \sqrt{0,9878 \cdot 0,8476} = 0,915 \text{ и т.д.}$$

Выберем по обобщенным параметрам наилучшую систему загрузки по газопроницаемости и распределению газовых нагрузок. Ей соответствует максимальное значение обобщенного параметра оптимизации $\gamma_3 = 0,9907$.

§ 3. Рекомендации к выбору планов эксперимента

После того как установлены факторы и параметры оптимизации, необходимо выбрать вид плана /6.1/, который удовлетворял бы всем требованиям или большинству из них. Существуют каталоги и таблицы стандартных планов эксперимента, которыми можно воспользоваться для выбора нужного плана. Планы эксперимента отличаются различным количеством опытов, факторов, их уровней и статистических характеристик, которые называются критериями оптимальности.

К первой группе относятся критерии оптимальности, связанные с точностью оценок параметров.

D-оптимальность. Планам, оптимальным по этому критерию, соответствует минимальный объем эллипсоида рассеивания оценок параметров оптимизации модели, являющегося многомерным аналогом доверительного интервала.

A-оптимальность. Этому критерию отвечают планы с минимальной средней дисперсией оценок коэффициентов. Эллипсоид рассеивания имеет наименьшую сумму квадратов длин осей.

E-оптимальность. Этим планам соответствует наименьшее значение максимальной оси эллипса рассеяния.

Ортогональность. В ортогональном плане направления главных осей эллипса рассеяния совпадают с направлениями координатных осей в факторном пространстве, а все оценки параметров независимы.

Ко второй группе относятся критерии и свойства планов, связанные с ошибкой в оценке модели.

G-оптимальные планы минимизируют на множестве планов максимальное значение дисперсии оценки модели и гарантируют отсутствие точек в области планирования с низкой точностью оценки модели.

Q-оптимальность минимизирует в планах среднюю дисперсию оценки модели.

Регрессионность постулирует постоянство дисперсии предсказания на равных расстояниях от центра эксперимента.

Униформность предполагает постоянство дисперсии предсказания в некоторой области вокруг центра эксперимента, например, с единичным радиусом.

Рандомизация представляет собой случайность в выборе порядка проведения экспериментов, измерений.

Кроме критериев оптимальности необходимо учитывать и некоторые квалитативные свойства планов, которые упрощают исследования.

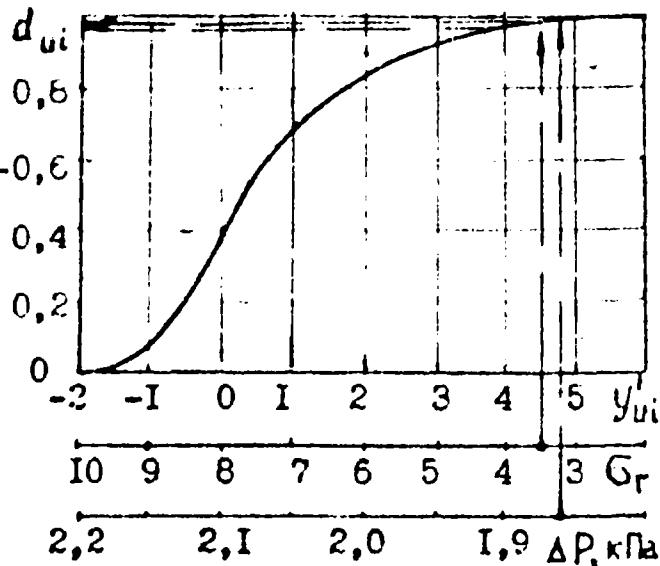


Рис.6.2. Шкала желательности Харрингтона

Насыщенность. План называют насыщенным для данной модели, если число опытов равно числу параметров модели. На практике обычно выбирают планы с минимальным числом опытов, близким к насыщенным.

Композиционность. Это свойство позволяет разделить эксперимент на несколько этапов и постепенно переходить от простых моделей к более сложным, используя предыдущие наблюдения.

Простота обработки. Зачастую практически важно выбирать такие планы, где все результаты эксперимента обрабатываются вручную по простейшим формулам.

Пример 6.2. Выбрать план эксперимента для исследования влияния факторов загрузки доменной печи: порядка скипов в подаче x_1 , массы подачи x_2 и уровня засыпи x_3 на параметры оптимизации /потери давления газа в сухой зоне на I м высоты y , и дисперсия газовых нагрузок по радиусу y_2 / . К плану эксперимента должны предъявляться такие требованиям.

1. Композиционность, поскольку неизвестна степень полинома, которому будет соответствовать будущая математическая модель. Линейность или нелинейность связей факторов с параметрами оптимизации будет установлена в процессе последовательного эксперимента. Свойству композиционности соответствуют 8 планов из 22, содержащихся в [23]: № 30, 32-34, 36, 38, 41 и 42, которые приведем в табл.6.2.

2. Минимальное количество уровней факторов, поскольку большое их количество установить на работающей доменной печи трудно, особенно для первого фактора. Второму требованию удовлетворяют лишь 4 плана из восьми предыдущих: № 30, 32, 34 и 42.

3. Желательность Д-оптимальности, так как важно получить минимальную обобщенную дисперсию коэффициентов, что обеспечивает достаточные предсказательные свойства модели внутри области определения эксперимента. Этому требованию отвечают лишь два плана: № 34 и 42. Эффективность этих планов по Д-критерию соответственно равна 0,986 и 0,967. Эффективность остальных двух планов № 30 и 32 гораздо ниже: 0,775 и 0,895.

4. Минимально возможное количество опытов. Планы № 34 и 42 имеют соответственно 14 и 27 опытов. Выберем план № 34 и приведем его параметры в табл.6.3.

Этот план реализуется по частям. Вначале для получения линейной модели реализуют 8 первых опытов; получая линейную модель $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$, проверяют адекватность /соответствие экспериментальным данным/, и если ее нет, то далее проводят следующие опыты этого плана, что позволит получить модель в виде полинома второй степени.

Таблица 6.2

Номер плана	Число факторов K	Число параметров модели K	Число опытов в плане N	Эффективность плана по критериям				d_{\max}^*	$ p _{\max}^{**}$	Особенности композиционного плана
				$e(D)$	$e(A)$	$e(E)$	$e(Q)$			
30	3	10	11	0,775	0,718	0,633	0,698	-	0,81	Трехуровневый
32	3	10	13	0,895	0,820	0,466	0,827	20,3	0,75	Симметричный, трехуровневый
33	3	10	13	0,986	0,896	0,601	0,854	-	0,47	Композиционный к планам главных эффектов
34	3	10	14	0,986	0,966	0,772	0,950	11,2	0,38	Симметричный, трехуровневый
36	3	10	15	0,780	0,794	0,610	0,870	25,1	0,53	Симметричный, ортогональный
38	3	10	16	0,863	0,940	0,821	0,957	22,0	0,49	Симметричный, минимаксный для проверки нелинейности модели
41	3	10	20	0,522	0,524	0,501	0,590	108,0	0,52	Симметричный, рогогабельный, униформный
42	3	10	27	0,967	0,972	0,673	0,944	13,8	0,53	Симметричный, ортогональный, трехуровневый, ПФЭ З ³

* Максимальное по области планирования значение нормированной дисперсии оценки модели.

** Максимальный модуль коэффициента корреляции оценок параметров.

Таблица 6.3

№ п/п	Уровень фактора																		
	x_1	x_2	x_3																
1	-I	-I	-I	4	+I	+I	-I	7	-I	+I	+I	10	+I	0	0	13	0	0	-I
2	+I	-I	-I	5	-I	-I	+I	8	+I	+I	+I	11	0	-I	0	14	0	0	+I
3	-I	+I	-I	6	+I	-I	+I	9	-I	0	0	12	0	+I	0				

§ 4. Получение линейных моделей исследуемого процесса

Для получения линейной модели типа $y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j$ необходим полный факторный эксперимент ПФЭ/, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов. Количество опытов в плане, основанном на ПФЭ, $N = U^K$ /где U - число уровней факторов; K - число факторов/. Так как для линейной модели достаточно варьировать каждый фактор на двух уровнях /верхнем +I и нижнем -I/, то количество опытов в ПФЭ будет зависеть только от числа факторов. Для двух факторов $N = 2^2 = 4$, для трех $N = 2^3 = 8$ и т.д. Вид плана формируется простым перечислением всех возможных сочетаний. Например, полный двухфакторный эксперимент для получения линейной модели будет выглядеть следующим образом: каждая строчка плана представляет собой условия опыта.

Полный трехфакторный эксперимент с расчетом получения линейной модели /все сочетания факторов/ будет таким.

Каждому опыту соответствует свое значение параметра оптимизации.

Полученный план реализуют: выполняют каждый опыт, соблюдая рандомизацию /случайность/ в выборе опытов и получают параметр оптимизации, соответствующий каждому опыту.

Коэффициент линейной модели /полинома первой степени/ определяют по результатам реализованного плана:

$$b_0 = \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) / N; \quad b_j = \left(\sum_{i=1}^N x_j y_i \right) / N \quad /6.7/$$

/где N - количество опытов в матрице; i, j - номер соответственно опыта и фактора/, подставляют в полином первой степени $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$ и получают исходную линейную математическую модель.

Далее следует доказать адекватность модели реальным условиям эксперимента разными способами.

I. Расчет эффектов взаимодействия:

$$b_{j\mu} = \left(\sum_i^N x_{ij} x_{i\mu} y_i \right) / N, \quad 16.8/$$

где j, μ - номера факторов.

Если хотя бы один эффект взаимодействия сравним с эффектами факторов b_j , то линейная модель неадекватна. Для адекватности линейной модели эффекты взаимодействия должны быть близкими к нулю или меньше значения свободного члена регрессии более чем на порядок /примерно в 20 раз/.

2. Определение адекватности модели в выбранной точке. Для этого проводят еще один эксперимент в центральной точке плана, т.е. факторы стабилизируются на нулевом уровне / $x_1 = 0; x_2 = 0; \dots, x_k = 0$ /.

Параметр оптимизации для этих условий рассчитывают по полученной математической модели \hat{y}_0 и сравнивают его с экспериментальным \bar{y}_0 по критерию Стьюдента:

$$t_{расч} = |(\bar{y}_0 - \hat{y}_0) / S_{оп}| \leq t_{табл}, \quad 16.9/$$

где $S_{оп}$ - ошибка опыта, которая в экспериментах может достигать 5-10% среднего значения параметра оптимизации; $S_{оп} = /0,05..0,1/ b_0$.

Если расчетный критерий Стьюдента $t_{расч}$ меньше его табличного значения $t_{табл}$, модель адекватна, если нет, требуется наращивать ее порядок.

Пример 6.3. Получить линейную математическую модель зависимости коэффициента распределения серы L_s доменной плавки для передельного чугуна от основности шлака $O_{ш}$ в пределах 0,8-1,6 и от содержания кремния в чугуне Si в пределах 0,4-1,2%.

Поскольку факторов два, воспользуемся ПФЭ типа 2^2 . Первый фактор x_1 - основность шлака, верхнему уровню /+1/ соответствует 1,6, нижнему /-1/ - 0,8, второй x_2 - содержание кремния, верхнему уровню соответствует 1,2%, нижнему - 0,4%.

Занесем выбранный план в табл.6.4 вместе с натуральными значениями факторов, реализуем его /выполним все четыре опыта по плану/, в результате чего получим значения параметров оптимизации y_i .

Таблица 6.4

№ п/п	Фактор				Параметр оптимизации L_s	
	x_1		x_2		γ	δ
	Код	Натура, ед.	Код	Натура, %		
1	-1	0,8	-1	0,4	5,4	-1,15
2	+1	1,6	-1	0,4	5,6	12,15
3	-1	0,8	+1	1,2	19,0	25,55
4	+1	1,6	+1	1,2	45,4	38,85

По /6.7/ рассчитаем коэффициенты регрессии полинома первой степени /линейной модели/: $B_0 = (5,4 + 5,6 + 19 + 45,4) / 4 = 18,85$; $B_1 = -5,4 + 5,6 - 19 + 45,4 / 4 = 6,65$; $B_2 = 13,35$. Линейная математическая модель $L_s = f(0_w, Si)$ имеет следующий вид: $y = 18,85 + 6,65x_1 + 13,35x_2$.

Определим адекватность /пригодность/ модели по значению эффекта взаимодействия /коэффициента регрессии при x_1, x_2 /, для чего рассчитаем последний по /6.8/: $B_{12} = (5,4 - 5,6 - 19 + 45,4) / 4 = 6,5$. Эффект взаимодействия очень велик, соизмерим с коэффициентами регрессии полинома, поэтому можно заключить, что линейная модель не адекватна. Для дополнительной проверки рассчитаем по модели значения параметров оптимизации для условий четырех опытов согласно табл.6.4: $\hat{y}_1 = 18,85 + 6,65/-1/ + 13,35/-1/ = -1,15$; $\hat{y}_2 = 12,15$; $\hat{y}_3 = 25,55$; $\hat{y}_4 = 38,85$. Занесем их в табл.6.4 и сравним с экспериментальными значениями. Как видно, совпадения нет /расхождение опытных и расчетных значений гораздо более 10%, что также указывает на неадекватность модели. В этом случае необходимо получить нелинейную модель, например, полином второй степени.

Количество опытов в полном факторном эксперименте превосходит число определяемых коэффициентов линейной модели и тем значительнее, чем больше факторов. Это дает возможность сократить количество опытов для изучения многофакторных процессов. Например, чтобы оценить влияние трех факторов на параметр оптимизации, можно воспользоваться половиной ПФЭ /полурепликой/ с четырьмя опытами, четырьмя-восьмью опытами и т.д. /см.табл.6.5/. Определенные части полного факторного эксперимента называются дробными репликами. Таким образом, для получения линейной математической модели исследуемого процесса можно воспользоваться не полным факторным экспериментом, а его частью – долей реплики. Это позволило резко сократить количество опытов без уменьшения надежности математической модели.

Таблица 6.5

Число факторов	Дробная реплика	Условное обозначение	Число опытов	
			для дробных реплик	для полного факторного эксперимента
3	1/2 реплика от 2^3	2^{3-1}	4	8
4	1/2 реплика от 2^4	2^{4-1}	8	16
5	1/4 реплика от 2^5	2^{5-2}	8	32
6	1/8 реплика от 2^6	2^{6-3}	8	64
7	1/16 реплика от 2^7	2^{7-4}	8	128
8	1/16 реплика от 2^8	2^{8-4}	16	256
9	1/32 реплика от 2^9	2^{9-5}	16	512
10	1/64 реплика от 2^{10}	2^{10-6}	16	1024
11	1/128 реплика от 2^{11}	2^{11-7}	16	2048

Пример 6.4. Получить полиномиальную математическую модель зависимости перепада давления газового потока в шахте доменной печи от массы подачи M , уровня засыпи h и количества мелочи фракции 0...5 мм в шахте α при среднем количестве дутья. Значения факторов изменяются в следующих пределах: $M = 26 \dots 30$ г; $\alpha = 5 \dots 25\%$; $h = 1,25 \dots 1,75$ м. Параметр оптимизации ΔP , кН/м.

Определим интервалы варьирования факторов: $J_1 = (30-26)/2 = 2$ г; $J_2 = (25 - 5)/2 = 10\%$; $J_3 = (1,75 - 1,25)/2 = 0,25$ м. Закодируем уровни факторов: верхнему уровню соответствуют максимальные, нижнему – минимальные, среднему – нулевые значения.

В качестве плана выберем полреплики ПФЭ типа 2^{3-1} . Запишем в табл.6.6 кодированные и соответствующие им натуральные значения факторов. Реализуем план /выполним его экспериментально, получив ряд значений параметра оптимизации Y_s .

Рассчитаем коэффициенты регрессии полинома /математической модели/ по /6.7/: $B_0 = (1,5 + 2,5 + 3,7 + 7,0)/4 = 3,675$; $B_1 = (-1,5 + 2,5 - 3,7 + 7)/4 = 1,075$; $B_2 = 1,675$; $B_3 = 0,575$.

Таким образом, линейная модель исследуемого процесса имеет вид $Y = 3,675 + 1,075x_1 + 1,675x_2 + 0,575x_3$.

Проверяем адекватность по выбранной точке. Для этого ставим дополнительный эксперимент в точке 5 на нулевых уровнях факторов. Экспериментальное значение параметра оптимизации $Y_s = 3,2$. Подсчитаем его значение в этой точке по модели $\hat{Y}_s = 3,675 + 1,075 \cdot 0 + 1,675 \cdot 0 + 0,575 \cdot 0 = 3,675$.

Таблица 6.6

п/п	Фактор						Параметр оптимизации ΔP , кПа/м y	
	x_1		x_2		x_3			
	Код	Натура, т	Код	Натура, %	Код	Натура, м		
1	-I	26	-I	5	+I	1,75	1,5	
2	+I	30	-I	5	-I	1,25	2,5	
3	-I	26	+I	25	-I	1,25	3,7	
4	+I	30	+I	25	+I	1,75	7,0	
5	0	28	0	15	0	1,5	3,2	

Определим критерий Стьюдента и сравним с табличным по /6.9/, считая, что ошибка опыта не более 5%: $t_{\text{расч}} = (3,675 - 3,2) / 0,05 \cdot 3,675 = 2,6 < 2,776 = t_{\text{табл.}}^{0,05}$.

Расчетное значение критерия Стьюдента меньше табличного, значит, модель адекватна. Для удобства пользования математической моделью приведем ее к натульному значению факторов по формуле кодирования /6.2/

$$\Delta P = 3,675 + 1,075 \frac{M - 28}{2} + 1,675 \frac{d - 15}{10} + 0,575 \frac{h - 1,5}{0,25} = -17,338 + 0,537M + 0,167d + 2,3h.$$

§ 5. Отсеивание факторов

Все металлургические процессы характеризуются многофакторностью. Увеличение количества факторов влечет за собой рост количества опытов, необходимых для описания исследуемого процесса. Но неучет одного из влияющих на процесс факторов может значительно отразиться на конечных результатах исследований и исказить реальные взаимосвязи, что повлечет за собой неверные технологические рекомендации.

Таким образом, возникает проблема постановки небольшого числа опытов с учетом наибольшего количества подозреваемых факторов в целях

получения априорной информации, позволяющей отсеять факторы, несущественно влияющие на исследуемый процесс. Эта процедура называется отсеивающими экспериментами.

Число опытов можно существенно уменьшить, если воспользоваться дробными репликами факторных планов. При этом необходимо стремиться к насыщенным планам, когда количество опытов на единицу больше, чем факторов, в этом случае предполагается, что имеются только линейные эффекты.

Приведем дробные факторные планы для отсеява $K = 4\text{-}7$ факторов:

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
1	-	-	-	-	-	-	-
2	+	+	+	+	-	-	-
3	+	+	-	-	+	+	-
4	+	-	+	-	-	+	+
5	+	-	-	+	+	-	+
6	-	+	+	-	+	-	+
7	-	+	-	+	-	+	+
8	-	-	+	+	+	+	-

и $K = 8\text{-}11$ факторов:

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
I	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
2	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
3	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
4	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
5	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
6	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
7	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
8	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+
10	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
II	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Выбранный план теперь необходимо реализовать, т.е. выполнить экспериментально. Результаты опытов в виде параметра оптимизации Y_i следует занести в ту же таблицу.

Далее необходимо подсчитать коэффициенты регрессии по /6.7/, поскольку их значение свидетельствует о степени влияния каждого фактора на параметр оптимизации. Значения коэффициентов регрессии выстраиваются /по ранжиру/, а отсеиваются те факторы, абсолютная величина эффектов которых меньше двойной или тройной ошибки опыта. Поэтому важно правильно определить ошибку опыта в экспериментах и рассчитать ее.

Ошибка определяется по опытам, повторенным несколько раз в одних и тех же условиях. Рекомендуется при реализации плана каждый опыт повторять дважды, а если результаты отличаются более чем на 10%, то трижды. Одно из трех значений этого опыта может быть отснято как случайное по одному из критериев, что позволит снизить общую ошибку опыта. Например, отсев одного из повторных опытов по критерию Стьюдента

$$t_{\text{расч}} = (\bar{y}' - \bar{y}) / \sqrt{\left(\sum_i^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \right) / m} \geq t_{\text{табл}}, \quad /6.10/$$

где \bar{y}'_i - наиболее сильно отличающееся значение параметра оптимизации от повторных; \bar{y} - среднее значение параметра оптимизации из повторных опытов, не считая \bar{y}'_i ; m - количество параллельных /повторных/ опытов; $t_{\text{табл}}$ - табличное значение критерия Стьюдента, взятое из табл.П.1.5.

Суммарная ошибка опытов

$$S_{\text{оп}} = \sqrt{\left(\sum_i^n \sum_j^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2 / n(m-1) \right)}, \quad /6.11/$$

где n - количество опытов с повторениями.

На практике количество повторений каждого опыта чаще всего неодинаково; тогда ошибку эксперимента подсчитывают из условия суммирования средневзвешенных значений дисперсий

$$S_{\text{оп}} = \sqrt{\left(\sum_i^n \sum_j^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2 (m_i - 1) / n \sum_i^m (m_i - 1) \right)}. \quad /6.12/$$

Этими формулами можно пользоваться только в том случае, когда дисперсии однородны, т.е. среди дисперсий каждого опыта не должно быть таких, которые превышали бы все остальные на определенную величину. Дисперсия однородности проверяется по критерию Кохрена /табл.П.1.7/:

$$G_{\text{расч}} = S_{\text{max}}^2 / \sum_i^n S_i^2 \leq G_{\text{табл}}. \quad /6.13/$$

После того как однородность дисперсии доказана, рассчитываются суммарная ошибка опыта по /6.11/, /6.12/ и доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta \beta_j = \pm t_{\alpha, N-1} S_{\text{оп}} / \sqrt{N}, \quad 16.14/$$

где $t_{\alpha, N-1}$ - табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости α и степени свободы $N-1$; N - количество опытов в матрице-плане.

Если $|\beta_j| < |\Delta \beta_j|$, то коэффициент незначим, а соответствующий ему фактор не оказывает существенного влияния на параметр оптимизации. Такой фактор должен быть исключен /отсекан/ или зафиксирован на определенном уровне. Если по данным экспериментов и расчетов слишком много факторов отсекалось и среди них оказались такие, которые по логике не должны быть отсеканы, то вполне вероятно, что неправильно выбраны интервалы варьирования. Для этих факторов последние рекомендуется увеличить и поставить новую серию экспериментов по тому же плану.

Оставшийся набор факторов после отсева можно еще сократить, объединив факторы в безразмерные комплексы с помощью теории размерностей /Л-теоремы/.

Пример 6.5. Шихтовый материал, ссыпаясь с большого конуса засыпного аппарата доменной печи, ударяется о поверхность засыпи по периферийному кольцу, ширина которого неизвестна. Для определения удельной силы удара необходимо установить ширину кольцевого потока шихты $\delta(x)$.

Предполагали, что на ширину потока влияли шесть факторов: уровень засыпи $h(x_1)$, ход конуса $H(x_2)$, диаметр шихты $d_w(x_3)$, угол наклона образующей конуса $\alpha_K(x_4)$, величина кромки конуса $\alpha(x_5)$ и выход колошникового газа $Q(x_6)$. Эксперименты проводили на модели загрузочного устройства в 1/10 натуральной величины доменной печи полезным объемом 1719 м³. Каждый из факторов имел значения на двух уровнях.

Уровень	Фактор					
	$h(x_1)$	$H(x_2)$	$d_w(x_3)$	$\alpha_K(x_4)$	$\alpha(x_5)$	$Q(x_6)$
				град.		
Верхний /+/	300	57	3-5	54	40	0,23
Нижний /-/	50	25	0,5-1	30	0	0

При проведении экспериментов воспользовались одной восьмой реплики полного шестифакторного эксперимента типа 2^{6-3} . Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл.6.7.

Таблица 6.7

Номер опыта	Фактор						Параметр оптимизации - ширина потока, мм		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	\bar{x}	$\bar{y}_{\text{пог}}$	\bar{z}
1	+	+	+	+	+	+	37,5	41,2	39,3
2	-	+	-	+	+	-	22,8	23,4	23,1
3	-	+	+	-	-	+	26,5	26,7	26,6
4	+	-	-	+	-	+	30,4	31,0	30,7
5	+	-	+	-	+	-	34,3	33,9	34,1
6	-	-	-	-	+	+	17,1	23,3 19,3	18,2
7	-	-	+	+	-	-	15,0	15,6	15,3
8	+	+	-	-	-	-	39,8	43,2	41,5

Каждый опыт был реализован дважды для определения ошибки эксперимента. Из двух результатов определялось среднее \bar{y} .

В опыте 6 разбег значений параметра оптимизации получился значительным, поэтому был проведен еще один опыт, а результат приведен в графе $\bar{y}_{\text{пог}}$ табл.6.7 в знаменателе. В опытах отсаялось значение

$y_6 = 23,3$ мм, поскольку оно слишком отличалось от первого и третьего результатов. Рассчитаем критерий Стьюдента /6.10/ и сравним с табличным:

$$\begin{aligned} t_{\text{расч}} &= (23,3 - 18,2) / \sqrt{(17,1 - 18,2)^2 + (19,3 - 18,2)^2 / 2} = \\ &= 4,63 > 4,303 = t_{\text{табл}}^{0,05}. \end{aligned}$$

Расчетный критерий Стьюдента больше табличного, поэтому сомнительное значение параметра оптимизации исключается как случайное.

Для определения степени влияния каждого фактора на параметр оптимизации по /6.7/ рассчитаем коэффициенты регрессии: $B_0 = (39,3 + 23,1 + 26,6 + 30,7 + 34,1 + 18,2 + 15,3 + 45,5) / 8 = 28,675$; $B_1 = (39,3 - 23,1 - 26,6 + 30,7 + 34,1 - 18,2 - 15,3 + 41,5) / 8 = 7,8$; $B_2 = 4,025$; $B_3 = 0,225$; $B_4 = -1,5$; $B_5 = 0,075$; $B_6 = -0,025$.

Наибольшее влияние на ширину струи, судя по абсолютной величине коэффициентов регрессии, оказывает первый фактор $b(x_1)$ /уровень засыпи/, самое малое - шестой $Q(x_6)$ /расход дутья/. Для определения количества значащих, влияющих на процесс факторов рассчитаем ошибку эксперимента, доверительный интервал и сравним с ним значения коэффициентов регрессии. Но прежде убедимся, что воспроизводимость опыта достаточна. Для этого рассчитаем дисперсии по всем восьми опытам: $S_1^2 = ((37,5 - 39,3)^2 + (41,2 - 39,3)^2) / (2 - 1) = 6,48$; $S_2^2 = 0,18$; $S_3^2 = 0,02$; $S_4^2 = 0,18$; $S_5^2 = 0,08$; $S_6^2 = 2,42$; $S_7^2 = 0,18$; $S_8^2 = 8,82$.

Рассчитаем критерий Кохрена G , для чего выберем максимальную дисперсию /в данном случае $S_{\sigma}^2 = 8,82$ / и поделим на сумму всех дисперсий:

$$G_{расч} = 8,82 / (6,48 + 0,18 + 0,02 + 0,18 + 2,42 + 0,18 + 8,82) = \\ = 0,482.$$

Сравним его с табличным значением при $f_1 = m - 1$:

$f_2 = N$: $G_{расч} = 0,482 < 0,6798 = G_{табл}^{0,05}$; значит, дисперсии однородны, а воспроизводимость эксперимента достаточна.

Рассчитаем среднеквадратичные ошибки эксперимента $S_{оп} = ((6,48 + 0,18 + 0,02 + 0,18 + 0,08 + 2,42 + 0,18 + 8,82)/8)^{0,5} = 1,52$ я коэффициентов регрессии $S_{\beta_i} = 1,52 / \sqrt{8} = 0,538$. Найдем доверительный интервал для коэффициентов регрессии $\Delta\beta_i = 0,538 \cdot 2,306 = 1,24$.

Все коэффициенты регрессии по абсолютной величине сравниваем с доверительным интервалом. Видно, что только три фактора значимы: уровень засыпи $h(x_1)$, ход конуса $H(x_2)$ и угол наклона образующей конуса $\alpha_x(x_3)$. Остальные факторы незначимы, следовательно, они отсеиваются.

§ 6. Нелинейные планы для описания исследуемого процесса

Большая часть исследуемых процессов и явлений не может быть описана полиномом первой степени. В этом случае необходимо попытаться описать исследуемый процесс полиномом второй степени:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j^2 + \sum_{j < u} \beta_{ju} x_j x_u. \quad /6.15/$$

Для этого эксперименты необходимо провести таким образом, чтобы каждый фактор варьировался не на двух уровнях, как для линейной модели, а на трех и более, поскольку кривая линия или поверхность не могут быть проведены через две точки. Однако эксперименты, поставленные для получения линейной модели, могут быть использованы как часть плана для описания процесса полиномом второй степени в качестве ядра – основы будущего плана. Это так называемые композиционные планы. В них к факторному плану /ядру/ добавляются эксперименты в середине факторного пространства /нулевые/ и в "звездных" точках, расстояние до которых от центра плана /нулевой точки/ называется "звездным плечом" и определяется видом плана, а также количеством экспериментов.

Так составляются ортогональные центральные композиционные планы второго порядка, структура которых приведена в табл.П.1.8.

Для квадратичной аппроксимации /приближения/ процесса рассчитывают коэффициенты регрессии:

$$\beta_0 = 0_1 \sum_{i=1}^N y_i - 0_1 / 0_2 \sum_{j=1}^n \beta_{jj}; \quad \beta_j = 0_2 \sum_{i=1}^N x_{ij} y_i; \quad 16.16/$$

$$\beta_{ji} = 0_4 \sum_{i=1}^N x_{ij} x_{ii} y_i; \quad \beta_{jj} = 0_3 \sum_{i=1}^N (x_{ij}^2 - \bar{x}_j^2) y_i,$$

где \bar{x}_j - среднее значение x_j по всем N опытам.

Далее определяют значимость коэффициентов регрессии, для чего сначала вычисляют их дисперсии:

$$S_{\beta_0}^2 = (0_1^2 + 0_2^2 0_3^2 / 0_2^2) S_{op}^2; \quad S_{\beta_j}^2 = 0_2 S_{op}^2; \quad S_{\beta_{ji}}^2 = 0_4 S_{op}^2; \quad S_{\beta_{jj}}^2 = 0_3 S_{op}^2. \quad 16.17/$$

Числовые коэффициенты, являющиеся комбинациями значений представленных факторов, приведены в табл. 6.8.

Таблица 6.8

O_i	Числовые значения коэффициентов при количестве факторов			
	2	3	4	5
O_1	0,11111	0,06667	0,04000	0,03704
O_2	0,16667	0,09141	0,05000	0,04811
O_3	0,50000	0,23041	0,12500	0,07220
O_4	0,25000	0,12500	0,06250	0,06250

Доверительные интервалы

$$\Delta \beta_0 = t_{\text{табл}} \sqrt{S_{\beta_0}^2} = t S_{\beta_0}; \quad \Delta \beta_j = t S_{\beta_j}; \quad \Delta \beta_{ji} = t S_{\beta_{ji}}; \quad \Delta \beta_{jj} = t S_{\beta_{jj}}. \quad 16.18/$$

Оценивают значимость коэффициентов и упрощают полином, исключая из него незначимые члены. Проверяют адекватность математической модели процессу с помощью критерия Фишера $F_{\text{расч}}$. Для этого рассчитывают дисперсию адекватности

$$S_{ag}^2 = \sum_i^N (\hat{y}_i - \hat{y}_i)^2 / f_{ag}, \quad 16.19/$$

где \hat{y}_i - расчетное значение параметра оптимизации; $f_{ag} = (N - K_n)$ - число степеней свободы для дисперсии адекватности; K_n - число коэффициентов регрессии полинома. Тогда критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = S_{ag}^2 / S_{op}^2. \quad 16.20/$$

Для дисперсии опыта находят число степеней свободы $f_{op} = n(m-1)$.

По табл.П.1.6 находят значение критерия Фишера $F_{\text{табл}}$ для соответствующего уровня значимости и степеней свободы. Если $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$, адекватность обоснована. Если приближение реального процесса полиномом второй степени неадекватно, необходимо прибегнуть к описанию процесса полиномом третьей степени. Ортогональные планы удобны простотой ручного расчета, поэтому они применяются тогда, когда факторов немного, а большая точность не нужна.

Наряду с ортогональными планами второго порядка применяют ротатабельные центральные композиционные унiform-планы, обладающие рядом преимуществ перед ортогональными. Одним из главных преимуществ является независимость дисперсий предсказанного значения параметра оптимизации от вращения плана. Ротатабельные планы, так же, как и ортогональные, представляют собой композицию из факторного плана или его части /при $K > 5$ / опытов в "звездных точках" и на нулевом уровне. Структура ротатабельных планов для различного количества факторов приведена в табл.П.1.8.

Коэффициенты регрессии и ошибки можно вычислить после реализации плана по упрощенным формулам

$$\begin{aligned} b_0 &= P_1 \sum_{i=1}^N y_i - P_2 \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i; \quad b_j = P_3 \sum_{i=1}^N x_{ij} y_i; \quad b_{jj} = P_4 \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i + \\ &+ P_5 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k x_{ij}^2 - P_2 \sum_{i=1}^N y_i; \quad b_{ji} = P_6 \sum_{i=1}^N x_{ij} x_{iu} y_i; \end{aligned} \quad 16.21/$$

$$S_{b0} = P_7 S_{\text{оп}}; \quad S_{bj} = P_8 S_{\text{оп}}; \quad S_{bij} = P_9 S_{\text{оп}}; \quad S_{biju} = P_{10} S_{\text{оп}}, \quad 16.22/$$

в которых коэффициенты P_i рассчитаны и приведены в табл.6.9 для различного количества факторов.

Таблица 6.9

P_i	Значения числовых коэффициентов при числе факторов			
	2	3	4	5
P_1	0,20000	0,16634	0,14285	0,15909
P_2	0,10000	0,05679	0,03571	0,03409
P_3	0,12500	0,07322	0,04167	0,04167
P_4	0,12500	0,06247	0,03125	0,03125
P_5	0,01874	0,00690	0,00372	0,00284
P_6	0,25000	0,12500	0,06250	0,06250
P_7	0,44721	0,40785	0,37796	0,39886
P_8	0,35358	0,27059	0,20412	0,20412
P_9	0,37923	0,26387	0,18700	0,18464
P_{10}	0,50000	0,35355	0,25000	0,25000

Для математического описания любого технологического процесса можно воспользоваться также некомпозиционными планами второго порядка, отвечающими другим критериям оптимальности [23].

Рассмотрим пример математического описания процесса десульфурации в доменной печи полиномом второй степени.

Пример 6.6. Получить математическую модель в виде полинома второй степени зависимости коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком L_s от основности шлака O_w и содержания в чугуне Si , %.

В примере 6.3 была сделана попытка описать этот процесс линейным полиномом, однако модель оказалась неадекватной. Поэтому необходимо описывать процесс полиномом второй степени. Для этого воспользуемся композиционным ортогональным планом так, чтобы применить эксперименты примера 6.3, выполненные для получения линейной модели. Дополним план опытами в нулевой и "звездных точках". Реализуем план, соблюдая рандомизацию /случайность в выборе очередности опытов/, причем каждый опыт повторим дважды для определения ошибки.

По /6.16/ рассчитаем коэффициенты регрессии:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,16667 \cdot (-6,3+4,9-21,0+46,9+34,7-13,5) = 7,617; \\ b_1 &= 12,817; \quad b_{12} = 0,25(6,3 - 4,9 - 21 + 46,9) = 6,825; \\ b_{11} &= 0,5/0,3333 (6,3 + 4,9 + 21,0 + 46,9 + 34,7 + 13,5) - \\ &\quad - 0,6667 \cdot (34,4 + 14,7 + 32,2) = -5,883; \quad b_{22} = -5,434; \\ b_2 &= 0,1111 (6,3+4,9+21,0+46,9+34,7+13,5+34,4+14,7+32,2) - \\ &\quad - 0,1111/0,1667 (-5,883 - 5,434) = 30,67. \end{aligned}$$

Рассчитаем среднеквадратичную ошибку опыта по /6.11/:

$$S_{оп} = \sqrt{\frac{((2/7,2 - 6,3)^2 + 2(5,6 - 4,9)^2 + 2(24,0 - 21,0)^2 + 2(48,4 - 46,9)^2 + 2(36,0 - 34,7)^2 + 2(15,5 - 13,5)^2 + 2(36,0 - 34,4)^2 + 2(16,0 - 14,7)^2 + 2(33,6 - 32,2)^2)}{(9/2 - 1)}}^{0,5} = 2,33.$$

Проверим однородность дисперсий по критерию Кохрена /6.13/, для чего найдем максимальную дисперсию из всех опытов /опыт № 3/ и разделим ее на сумму всех дисперсий: $b_{расч} = 18/48,9 = 0,368 < 0,6385 = b_{табл}^{0,05}$. Расчетный критерий меньше табличного, значит, дисперсии однородны.

Проверим значимость найденных коэффициентов регрессии, сравнив их с доверительными интервалами, рассчитанными по /6.17/, /6.18/:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= 2,306 \sqrt{(0,111+0,111)^2 \cdot 0,5 \cdot 2 / 0,16667^2} \cdot 2,33 = 4,03; \\ \Delta b_1 &= 2,306 \sqrt{0,16667} \cdot 2,33 = 2,2; \quad \Delta b_{11} = 2,306 \sqrt{0,25 \cdot 2,33} = \\ &= 2,68; \quad \Delta b_{22} = 2,306 \sqrt{0,5 \cdot 2,33} = 3,82. \end{aligned}$$

Сравнивая коэффициенты регрессии /по абсолютной величине/ с соответствующими доверительными интервалами, замечаем, что они больше последних, следовательно, значимы.

Таким образом, математическая модель процесса десульфурации чугуна в доменной печи определяется полиномом второй степени:

$$y = 30,67 + 7,617x_1 + 12,817x_2 + 6,825x_1x_2 - 5,883x_1^2 - 5,434x_2^2.$$

Адекватность полученной модели проверяем по критерию Фишера. Для этого рассчитаем по математической модели значения параметра оптимизации \hat{y} и занесем в табл. 6.10. Вычислим дисперсию адекватности /6.19/:

$$S_{\text{ад}}^2 = ((6,3 - 5,7)^2 + (4,9 - 7,3)^2 + (21 - 17,7)^2 + (46,9 - 46,6)^2 + (34,7 - 32,3)^2 + (13,5 - 17,2)^2 + (34,4 - 38)^2 + (14,7 - 12,4)^2 + (32,2 - 30,7)^2) / (9 - 6) = 16,993.$$

Таблица 6.1

Номер опыта	Фактор				Параметр оптимизации				Примечание	
	$x_1 (0_w)$		$x_2 (5_i)$		y	Повтор	\bar{y}	\hat{y}		
	Код	Натура	Код	Натура, %						
1	-1	0,8	-1	0,4	5,4	7,2	6,3	5,744	Ядро	
2	+1	1,6	-1	0,4	5,6	4,2	4,9	7,327	плана	
3	-1	0,8	+1	1,2	19,0	24,0	21,0	17,728	2^2	
4	+1	1,6	+1	1,2	45,4	48,4	46,9	46,612		
5	+1	1,6	0	0,8	33,4	36,0	34,7	32,404	"Звездные	
6	-1	0,8	0	0,8	15,5	11,5	13,5	17,17		
7	0	1,2	+1	1,2	32,8	36,0	34,4	38,053	"точки"	
8	0	1,2	-1	0,4	16,0	13,4	14,7	12,419		
9	0	1,2	0	0,8	30,2	33,6	32,2	30,67	Нулевая	

Рассчитаем критерий Фишера /6.20/ и сравним его с табличным значением /табл. П.1.6/: $F_{\text{расч}} = 16,993 / 2,33^2 = 3,13 < 4,07 = F_{\text{табл}}^{0,05}$. Расчетное значение критерия Фишера меньше, чем табличное, следовательно, модель адекватна.

Если заранее известно, что исследуемый процесс не может быть описан линейной моделью, надобность в композиционных планах отпадает. В этом случае вид плана выбирается исходя из других требований и критериев оптимальности /см. § 3/.

§ 7. Полиномиальное описание системы "состав - свойство"

Если исследуется система "состав - свойство", то для ее описания удобнее пользоваться симплекс-решетчатым планированием. Данный метод предложен Г.Шеффе в 1958 г. Основные его достоинства - минимальное количество опытов /насыщенные планы/ и возможность последовательного уточнения аппроксимации эксперимента математической моделью.

Основное условие для применения планов Шеффе - сумма долей всех компонентов, составляющих смесь, должна равняться единице: $\sum x_i = 1$. Поэтому факторное пространство является симплексом - простейшей фигурой, представляющей собой правильный треугольник для трех факторов, тетраэдр - для четырех факторов и т.д. Эксперимент ставится на основе стандартных матриц-планов, приведенных в табл.П.1.10. Для линейного процесса необходимо проделать опыты с монокомпонентами, для квадратичного описания - опыты и с бинарными смесями компонентов. Неполная кубическая и кубическая модели требуют всех трех параметров опытов, модель четвертой степени - еще и четверных смесей компонентов. Планы для разного количества компонентов составляются из матрицы, приведенной в табл.П.1.10. Планы-матрицы для более пяти компонентов составляются аналогично.

Для любого количества компонентов обычно составляют минимальный /линейный/ план, после реализации которого проверяют адекватность модели. Если модель неадекватна, наращивают количество опытов для модели следующего порядка - квадратичной; снова проверяют адекватность модели и в случае неадекватности переходят к следующей модели.

Общий вид полиномиальных моделей:

линейной

$$Y = \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad /6.23/$$

где $b_i = Y_i$ - коэффициенты регрессии;
квадратичной

$$Y = \sum_i b_i x_i + \sum_{i,j,k} b_{ij} x_i x_j, \quad /6.24/$$

где

$$b_{ij} = 4Y_{ij} - 2Y_i - 2Y_j; \quad /6.25/$$

специальной кубической

$$y = \sum_i^{\kappa} b_i x_i + \sum_{i,j}^{\ell} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,k}^m b_{ijk} x_i x_j x_k, \quad /6.26/$$

где

$$b_{ijk} = 27y_{ijk} - 12(y_{ij} + y_{ik} + y_{jk}) + 3(y_i + y_j + y_k); \quad /6.27/$$

кубической

$$y = \sum_i^{\kappa} b_i x_i + \sum_{i,j}^{\ell} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,k}^m \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i,j}^{\ell} \gamma_{ij} x_i x_j (x_i - x_j), \quad /6.28/$$

где

$$\begin{aligned} \beta_{ij} &= 9(y_{iij} + y_{iji} - y_i - y_j)/4; \quad \beta_{ijk} = 27y_{ijk} - 27(y_{iij} + \\ &+ y_{iji} + y_{ikk} + y_{jkk} + y_{iik} + y_{jik})/4 + 9(y_i + y_j + y_k)/2; \end{aligned} \quad /6.29/$$

$$\gamma_{ij} = 9(3y_{iij} - 3y_{iji} - y_i + y_j)/4. \quad /6.30/$$

Формулы для расчета полиномов более высокой степени приведены в специальной литературе [23].

После подсчета математической модели проверяют адекватность по выбранным точкам с помощью критерия Стьюдента. Для этого ставят эксперимент в любой интересующей экспериментатора точке (обычно для экономии опытов в точке, присущей плану высшего порядка). Подсчитывают критерий Стьюдента для выбранной точки:

$$t_{\text{расч}} = (\bar{y}_i - \hat{y}_i) \sqrt{m} / S_{\text{оп}} \sqrt{1 + \xi}, \quad /6.31/$$

где \hat{y}_i , \bar{y}_i – наблюдаемое значение отклика по m повторениям в этой точке соответственно расчетное и среднее; ξ – составляющая дисперсии предсказанного значения, рассчитываемая по зависимостям, приведенным в специальной литературе, значение которой колеблется примерно от 0,5 до 1,0 в разных местах факторного пространства.

Подсчитанный таким образом критерий Стьюдента для выбранной точки сравнивается с критическим значением $t_{\text{табл}}$ при степени свободы f , равной количеству опытов в матрице и уровню значимости $\alpha = 0,05$. Доверительный интервал для y

$$|dy| \leq S_{\text{оп}} \sqrt{\xi} t_{\alpha/2, m} / \sqrt{m}, \quad /6.32/$$

где m – число проверочных точек.

Часто при исследовании систем "состав - свойство" нет необходимости рассматривать всю область изменения свойств при изменении состава от 0 до 100% каждого компонента, а только какую-то часть системы. В этом случае выбирается необходимая область, где на вершинах симплекса будут уже не чистые компоненты, а их смеси /квазикомпоненты/. Для новой системы применяют те же стандартные планы, что и для обычной, состав точек в новом плане пересчитывают в соответствии с долей каждого комплексного компонента A , B или C . Все остальные процедуры выполняют аналогично.

Пример 6.7. Получить математическую модель распределения кислорода между шлаком и железом $\gamma = \% [O] / \% (FeO)$ при $1600^{\circ}C$ в мартеновской ванне по экспериментальным данным. Состав шлака: 20-50% $(CaO + MgO)$, 0-70% SiO_2 и 70-100% FeO .

Воспользуемся моделью "состав - свойство" на основе симплексно-решетчатого плана. Выберем кубическую модель, так как зависимость нелинейная, для чего запишем соответствующую матрицу /табл.6.11/.

Таблица 6.11

Номер опыта	Ин-декс опыта	Доля компонентов шлака			Состав шлака, %			$\gamma = \% [O] / \% (FeO)$		
								$t = 1600^{\circ}C$		
		x_1	x_2	x_3	SiO_2	FeO	$CaO+MgO$	первый γ	повторный γ	средний γ
I	γ_1	I	0	0	30	50	20	0,35		
2	γ_2	0	I	0	0	80	20	0,03		
3	γ_3	0	0	I	0	50	50	0,20		
4	γ_{122}	0,333	0,667	0	10	50	40	0,25		
5	γ_{133}	0,333	0	0,667	10	70	20	0,28		
6	γ_{233}	0	0,333	0,667	0	70	30	0,10		
7	γ_{112}	0,667	0,333	0	20	50	30	0,38	0,36	0,37
8	γ_{113}	0,667	0	0,333	20	60	20	0,33		
9	γ_{223}	0	0,667	0,333	0	60	40	0,09	0,07	0,08
10	γ_{123}	0,833	0,333	0,333	13	57	30	0,29	0,31	0,30
II	γ_{1123}	0,5	0,25	0,25	15	57	28	0,33		

Поскольку рассматривается часть тройной диаграммы, то на вершинах равностороннего треугольника отложим следующие квазикомпоненты /рис.6.31/: $x_1 = 130\% SiO_2$, 50% FeO и 20% $CaO + MgO$; $x_2 = 0\% SiO_2$, 80% FeO и 20% $CaO + MgO$; $x_3 = 10\% SiO_2$, 50% FeO и 50% $CaO + MgO$.

Выполним эксперименты по определению η в соответствии с матрицей /дополнительно – одиннадцатый эксперимент, не предусмотренный матрицей, но необходимый для определения адекватности/. Повторим опыты с минимальным, максимальным и средним параметрами оптимизации для определения ошибки опыта.

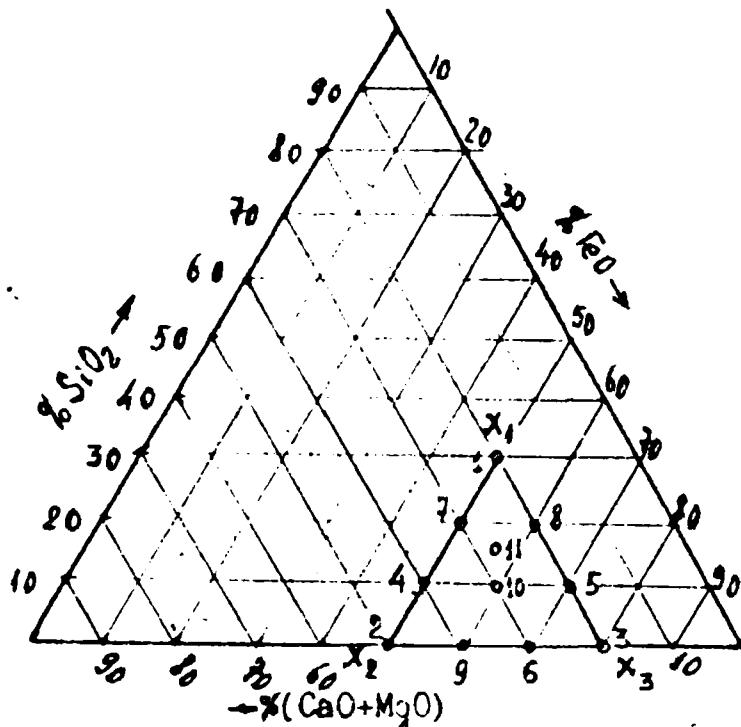


Рис.6.3. Тройная диаграмма "состав – свойство" для получения математической модели симплексно-решетчатым методом

Кубическая модель для трехкомпонентной смеси имеет вид $\eta = \beta_0 x_1 + \beta_1 x_2 + \beta_2 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \beta_{11} x_1^2 x_2 x_3$. Коэффициенты регрессии рассчитаем по /6.29/, /6.30/: $\beta_0 = 0,35$; $\beta_1 = 0,03$; $\beta_2 = 0,20$; $\beta_{12} = 9(0,37 + 0,25 - 0,35 - 0,03)/4 = 0,54$; $\beta_{13} = 0,135$; $\beta_{23} = -0,1125$; $\gamma_{12} = 9(3 \cdot 0,37 - 3 \cdot 0,25 - 0,35 + 0,03)/4 = 0,09$; $\gamma_{13} = 0,0225$; $\gamma_{23} = 0,2475$; $\beta_{11} = 27 \cdot 0,30 - 27(0,37 + 0,25 + 0,28 + 0,33 + 0,10 + 0,08)/4 + 9(0,35 + 0,03 + 0,20)/2 = 1,1925$.

Таким образом, модель зависимости распределения кислорода между шлаком и железом от химического состава шлака имеет вид $\eta = 0,35x_1 + 0,03x_2 + 0,20x_3 + 0,54x_1x_2 + 0,135x_1x_3 - 0,1125x_2x_3 + 0,09x_1x_2(x_1 - x_2) + 0,0225x_1x_3(x_1 - x_3) + 0,2475x_2x_3(x_2 - x_3) + 1,1925x_1x_2x_3$. Для определения адекватности модели рассчитаем ошибку эксперимента по повторным опытам № 7, 9, 10 /6.11/: $S_{\text{оп}} = ((2(0,38 -$

$-0,37)^2 + 2(0,09 - 0,08)^2 + 2(0,29 - 0,30)^2) / 3(2 - 1))^{0.5} = 0,01414.$
 Подсчитаем значение точки /опыта/ II по полученному полиному: $\hat{y} =$
 $= 0,35 \cdot 0,5 + 0,03 \cdot 0,25 + 0,2 \cdot 0,25 + 0,54 \cdot 0,5 \cdot 0,25 + 0,135 \cdot 0,5 \cdot 0,25 -$
 $- 0,1125 \cdot 0,25 \cdot 0,25 + 0,09 \cdot 0,5 \cdot 0,25 (0,5 - 0,25) + 0,0225 \cdot 0,5 x$
 $x 0,25 (0,5 - 0,25) + 0,2475 \cdot 0,25 \cdot 0,25 (0,25 - 0,25) + 1,1925 \cdot 0,5 \cdot 0,25 x$
 $x 0,25 = 0,334.$ Найдем критерий Стьюденга /6.31/: $t_{\text{расч}} = |(0,33 -$
 $- 0,334) \sqrt{2} / 0,01414 \sqrt{1 + 0,94}| = 0,287.$ Табличное значение крите-
 r рия при $f = 13$ /количество проведенных экспериментов с повторами/
 $0,05$
 $t_{\text{табл}} = 2,13$ больше расчетного, значит, модель адекватно описывает
 исследуемую систему.

При необходимости привести модель к натуральным значениям факто-
 ров SiO_2 , FeO , $CaO+MgO$ следует вместо x_1, \dots, x_3 подставить их значе-
 ния: $x_1 = 0,3 SiO_2 + 0,5 FeO + 0,2 (CaO+MgO)$; $x_2 = 0,8 FeO +$
 $+ 0,2 (CaO+MgO)$; $x_3 = 0,5 FeO + 0,5 (CaO+MgO)$.

§ 8. Экспериментальная оптимизация технологических процессов

Совершенствование металлургических процессов чаще всего связано с определением экстремальных значений технико-экономических показателей. Цель таких исследований – поиск оптимальных условий технологических процессов, составов сплавов, конструкций.

Оптимизацией /от лат. *optimus* – наилучший/ называется математическая процедура отыскания наивыгоднейших характеристик какой-либо системы.

По количеству априорной информации об исследуемом процессе опти-
 мизация бывает экспериментальная, когда неизвестна связь факторов с
 параметром оптимизации, и теоретическая, когда имеется математическая
 модель процесса.

По способу реализации пробных воздействий методы поиска экстрему-
 ма делятся на детерминированные и случайные.

При детерминированном поиске пробные движения осуществляются по
 определенному алгоритму, а направление и знаки приращений зависят от
 предыдущего движения, т.е. предыдущее определяет последующее. К детер-
 минированным методам поиска экстремума относятся метод кругового восхож-
 дения, наискорейшего спуска, Гаусса – Зейделя, условного экстремума
 /неопределенных множителей Лагранжа/, последовательный симплексный ме-
 тод /ПСМ/ и его разновидности и др.

В случайных стратегиях поиска направления превращений управляющих
 воздействий задаются случайным образом, причем все направления равно-

вероятны, а движение к экстремуму осуществляется в том случае, когда результат этого случайного движения приводит к улучшению параметра оптимизации. К случайным методам поиска экстремума относятся случайный перебор всех возможных значений, чисто случайный поиск – гомеостатический /самоорганизующийся/, статистический градиент – статистический наискорейший спуск.

Из перечисленных методов экспериментальной оптимизации рассмотрим два наиболее простых и эффективных: крутого восхождения /метод Бокса – Уильсона/ и ПСМ.

Крутое восхождение включает в себя дробный факторный эксперимент, аналогичный примененному при отсеивании факторов, статистический анализ полученных коэффициентов, выбор шага и крутое восхождение по истинной поверхности отклика.

Вначале ставится небольшая серия опытов для локального описания участка поверхности отклика полиномом первой степени, по результатам которой подсчитываются коэффициенты регрессии: $\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_K x_K$.

План-матрицу для этой серии выбирают аналогично § 5. Определяется градиент общей функции дифференцирования найденного полинома. Движение в направлении градиента – движение по кратчайшему пути. Таким образом, первая серия опытов позволяет выяснить общее направление и величину шага каждого фактора. Находим шаг поиска для каждого фактора. Он равен произведению коэффициента регрессии этого фактора β_i , на его интервал варьирования (δ_i). Для облегчения работы шаги обычно округляют. Если шаги некоторых факторов слишком малы /незначимы/, эти факторы стабилизируют на любом уровне и в движении по градиенту они не участвуют. Затем шаги прибавляют обычно к нулевому уровню факторов, намечая новые опыты. Последние не обязательно реализовать полностью, можно несколько опытов определить на основе найденного полинома и получить расчетное значение параметра оптимизации \hat{Y} , или вообще их не считать, а просто пропускать. Эта процедура называется реализацией мысленных опытов, число которых зависит от задачи и технологических условий. Сверху их ограничивает рубеж области определения хотя бы по одному из факторов.

Намеченные опыты реализуют до тех пор, пока не будет найден экстремум. Если параметр оптимизации переходит через экстремум, следует ставить новую серию опытов, снова наметить направление и шаг поиска и так – до определения экстремума.

Пример 6.8. Найти максимальное значение степени использования колошникового газа по показателю $\eta_{CO} = 100 \cdot CO_2/(CO+CO_2)$ для домен-

ной печи полезным объемом 2000 м^3 , оборудованной конусным загрузочным устройством. Определить соответствующие этому значению оптимальную массу железорудной части и систему загрузки, выраженную показателем σ , представляющим собой степень загруженности периферии колошника железорудной частью подачи.

Для начала поиска методом кругого восхождения воспользуемся пла-

Таблица 6.12 ном полного факторного эксперимента 2^2
Реализуем его и получим значения па-

Номер опыта	Фактор		Параметр оптимизации
	x_1	x_2	
	Код $M, \text{ т}$	Код σ	
1	-I	25	-I 0,7
2	+I	26	-I 0,7
3	-I	25	+I 0,8
4	+I	26	+I 0,8

метров оптимизации /табл.6.12/. По /6.7/ рассчитаем коэффициенты регрессии полинома: $B_0 = (39 + 39,8 + 40,1 + 41)/4 = 159,9/4 = 39,975$; $B_1 = (-39 + 39,9 - 40,1 + 41)/4 = 1,7/4 = 0,425$; $B_2 = 0,575$. Линейная модель $\sigma = 39,975 + 0,425x_1 + 0,575x_2$.

Определим шаги по факторам для последующих опытов, некоторые округлим /табл.6.13/.

Таблица 6.13

Показатель	Фактор	
	x_1	x_2
Коэффициент регрессии	0,425	0,575
Интервал варьирования	0,5 т	0,05
Шаг поиска B_i, J_i	0,2125 т	0,02875
Увеличенный и округленный шаг	0,5 т	0,07
Нулевой уровень	25,5 т	0,75

Поскольку масса подачи 212,5 кг неудобна для экспериментирования на доменной печи, увеличим ее в 2,5 раза и, округлив, получим 0,5 т; то же сделаем и для второго фактора, получим 0,07. Эксперименты начинаем с нулевого уровня. Поскольку необходимо искать максимум, шаг каждого фактора прибавляем к нулевому уровню. Последовательно проводим опыты и определяем значения параметра оптимизации, занося их в табл.6.14.

В опыте № 10 параметр оптимизации уменьшается. Чтобы не ошибиться в выборе решения, повторяем этот опыт. При уменьшении параметра оптимизации необходимо определить новое направление, поставив новую серию опытов, аналогичную первой.

Таблица 6.14

Номер опыта	Вид опыта	Фактор		γ	Параметр оптимизации, γ , %	
		x_1 , г	x_2		Повтор	Среднее
5	Нулевой	25,5	0,75	40,1		
6	Реализованный	26,0	0,82	41,1		
7	Мысленный	26,5	0,89	-		
8	"	27,0	0,96	-		
9	Реализованный	27,5	1,03	43,4		
10	"	28,0	1,1	41,4	41,8	41,6
14	Реализованный	28,4	1,0	44,5		
15	"	28,8	0,9	44,3	44,2	44,25

Для экономии количества опытов используем опыт № 10 поиска как составляющий нового плана /табл.6.15/.

Таблица 6.15

Коэффициенты регрессии $B_0 =$
 $= 42,4$; $B_1 = 0,40$; $B_2 = -0,95$.
 Шаги поиска: для первого фактора $0,40 \cdot 0,5 = 0,2$ г, для второго $-0,95 \cdot 0,05 = -0,0475$. Увеличим шаги поиска втрое и округлим; получим 0,4 и -0,1. Прибавляем их к условиям опыта № 10 и реализуем опыт № 14 /табл.6.14/. Значение параметра увеличивается до 44,5, при реализации опыта № 15 оно несколько уменьшается. Значит, максимальному использованию газового потока соответствуют масса подачи $M = 28,4 - 28,8$ г и $B = 0,9 - 1,0$. Геометрическая интерпретация поиска показана на рис.6.4.

Для более точного определения оптимума необходимо поставить серию экспериментов в конечных точках факторного пространства, описать процесс полиномом второй степени и исследовать его на экстремум.

Поиск ПСМ обладает рядом преимуществ по сравнению с методом кругового восхождения: минимум опытов /при K факторах $K+1$ опыта/, легкость проведения экспериментов /не надо выполнять расчеты по сложным уравнениям/ и пр. Первоначальный план задается в виде симплекса – простейшей правильной фигуры в пространстве /для двух факторов это правильный треугольник, для трех – пирамида и т.д./. Кодированные планы для 2-7 факторов, которые можно причислить к стандартным, приведены в прил.2.

Интервалы варьирования факторов выбираются аналогично описанному,

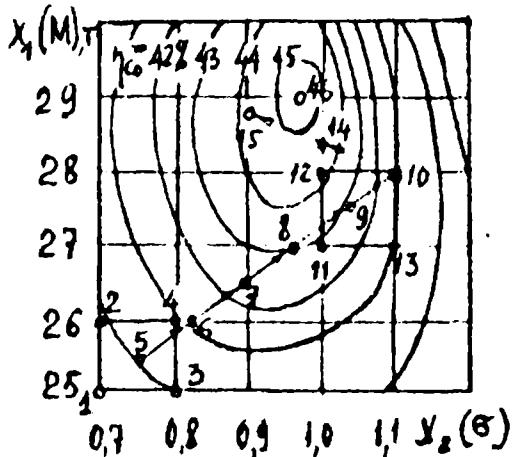


Рис.6.4. Схема движения к оптимуму в факторном пространстве x_1, x_2 методом кругого восхождения: 1-15 — номера опытов; $\bar{x}_\text{оп}$ — параметр оптимизации

значения в худшем опыте; \bar{x}'_i —

По новым значениям факторов ставится опыт и процедура повторяется до достижения оптимума. После этого симплекс начинает вращаться вокруг оптимальной точки /зацикливание/. Для выяснения своевременности окончания поиска можно применить формулу

$$\sqrt{\sum_{i=1}^K (\bar{y}_i - \bar{y}_x)^2 / K} < S_{\text{оп}}, \quad /6.34/$$

где \bar{y}_x — параметр оптимизации в точке симплекса; \bar{y}_x' — среднее значение по симплексу.

В процессе экспериментирования полезно через $K+1$ шаг повторить опыты во всех старых точках. Если получен очень высокий результат, отчего симплекс начинает вращаться вокруг этой точки, надо повторить опыт во избежание ошибки. И, наконец, если происходит колебание симплекса /возврат в старую точку/, необходимо проверить другую /не наихудшую/ точку последнего симплекса.

После нахождения конечного результата последний симплекс можно использовать в качестве основы для математического описания области /почти стационарной/ оптимума. К опытам последнего симплекса добавляется несколько опытов по специальному плану, который называется симплексно-суммируемым.

факторы кодируются по формуле /6.2/.

Реализуется начальный план, состоящий из $K+1$ опыта, и находится худшая точка плана по параметру оптимизации. Далее план дополняется следующим опытом, противоположным худшей точке относительно начального симплекса. Вносится предположение, что лучшая точка находится в противоположном направлении от худшей. Новые значения факторов /уровни/

$$x_{i,N+1} = \frac{2}{K} \sum_{i=1}^N x_i - x'_i, \quad /6.33/$$

где K — количество факторов; $\sum_{i=1}^N x_i$ — сумма прежних значений факторов без значение фактора в худшем опыте.

Существует несколько модификаций ПСМ, из которых надо отдать предпочтение усовершенствованному методу Умеда - Ичикова.

Пример 6.9*. При поступлении в шихту циклонной пыли резко снижаются производительность агломашины и качество агломерата. Найти оптимальное содержание топлива и влаги для случая, когда в шихту добавляют 10% циклонной пыли.

Итак, имеется два переменных фактора w и C - проценты влаги и топлива в шихте. Параметр оптимизации - производительность P , рассчитанная с учетом выхода годного: $P = 0,6 \gamma V_{sp} A Q_p / Q_w$, где γ - насыпная масса шихты; V_{sp} - вертикальная скорость спекания; A - выход годного из аглоспека; Q_p , Q_w - масса соответственно агломерата и шихты.

Для поиска оптимальной технологии воспользуемся обычным ПСМ.

Выберем матрицу начального симплекса и запишем в табл.6.16. Исходя из фактических данных работы аглофабрики и результатов лабораторных исследований выбраны исходная точка - центр начального симплекса /нулевой уровень/ и масштабы по осям переменных /интервалы варьирования/. Значения факторов, соответствующие коду матрицы, рассчитывают по /6.33/. Для опыта № 1 $w_1 = x_1^0 + J_1 x_1 = 7,4 + 0,2 \cdot 0,5 = 7,5\%$; $C_1 = x_2^0 + J_2 x_2 = 5,2 + 0,1 \cdot 1,0 = 5,3\%$; для опыта № 2 $w_2 = 7,5\%$; $C_2 = 5,2 - 0,1 \cdot 1,0 = 5,1\%$; для опыта № 3 $w_3 = 7,4 - 0,2 \cdot 1,0 = 7,2\%$; $C_3 = 5,2\%$.

Таблица 6.16

Параметр планирования	Количество в шихте, %				Параметр оптимизации производительность P , $t/(m^2 \cdot q)$	Обозначение симплекса на рис.6.5	Номера опытов, входящих в симплексы			
	влаги		топлива							
	Код	Нагура	Код	Нагура						
x_1	w	x_2	C							
I	2	3	4	5	6	7	8			
Нулевой уровень	x_1^0	7,4	x_2^0	5,2						
Интервал варьирования	J_1	0,2	J_2	0,1						
Опыт №:										
1	0,5	7,5	1	5,3	1,19					
2	0,5	7,5	-1	5,1	1,20					
3	-1	7,2	0	5,2	1,16	A	1,2,3			

* См.: Пегрушев С.Н., Дорофеев В.Н. Определение оптимального содержания влаги и топлива в шихте // Металлургия и коксохимия. - № 38. - К.: Техника, 1974. - С.3-5.

I	: 2 :	3 : 4 :	5 :	6	: 7 :	8
4		7,8	5,2	1,23	Б	1,2,4*
5		7,8	5,0	1,38	В	2,4,5
6		8,1	5,1	1,30	Г	4,5,6
7		8,1	4,9	1,45	Д	5,6,7
8		7,8	4,8	1,55	Е	5,7,8
9		8,1	4,7	1,64	Ж	7,8,9
10		7,8	4,6	1,58	И	8,9,10
11		8,1	4,5	1,61	К	9,10,11
12		8,4	4,6	1,62	Л	9,11,12
13		8,4	4,8	1,62	М	9,12,13

* Черточка под цифрой обозначает наихудшее значение параметра оптимизации в этом опыте.

Поставим три опыта в соответствии с расчетными факторами, причем остальные параметры процесса постараемся поддерживать одинаковыми. Из трех опытов начального симплекса худшим является опыт № 3 /производительность 1,16 г/(м²·ч), следовательно, данная точка "отражается" относительно оси первого и второго опыта. Для этого находим значения факторов, соответствующих новой точки по /6.33/:

$$\omega_4 = \frac{2}{2} (\omega_1 + \omega_2) - \omega_3 = \frac{2}{2} /7,5+7,5/ - 7,2 = 7,8\%;$$

$$C_4 = \frac{2}{2} (C_1 + C_2) - C_3 = \frac{2}{2} /5,3 + 5,1/ - 5,2 = 5,2\%.$$

Ставим опыт с измененными факторами. Теперь рассматриваем симплекс Б /опыты № 1,2,4/. Худшая его точка – опыт № 1 /рис.6.5/. Строим "отражение" этой точки $\omega_5 = \frac{2}{2} /7,5+7,8/ - 7,5 = 7,8\%$, $C_5 = \frac{2}{2} /5,1 + 5,2/ - 5,3 = 5,0\%$. Это симплекс В /опыты № 2,4,5/, худшая точка в нем – опыт № 2. Процедуру повторяем до тех пор, пока не достигнем максимального значения параметра оптимизации. Опыт № 9 имеет максимальное значение производительности /1,64 г/(м²·ч). Далее происходит заикливание. Оптимум параметров найден – это 8,1% влаги и 4,7% топлива в шихте. Геометрическая интерпретация поиска оптимума показана на рис.6.5.

§ 9. Оптимизация по математическим моделям

Из всего многообразия методов теоретической оптимизации, которые приводятся в специальной литературе, рассмотрим наиболее простые и эффективные: метод, основанный на исследовании функций на экстремум, и компромиссный метод /неопределенных множителей/ Лагранжа.

Экстремум параметра оптимизации известной нелинейной модели находят, определяя частные производные по каждому фактору и приравнивая их к нулю:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial \psi}{\partial x_2} = 0; \quad \dots; \quad /6.35/$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_j} = 0; \quad \dots; \quad \frac{\partial \psi}{\partial x_k} = 0.$$

Решается система уравнений относительно факторов $x_1, x_2,$

\dots, x_k , где значения последних и будут коэффициентами стационарной точки. Чтобы определить, максимум или минимум находится в данной точке, необходимо найти для нее полный дифференциал второго порядка $d^2\psi$. Если его квадратичная форма определена отрицательно, имеет место максимум, если положительно, – минимум.

Вид экстремума в точке можно определить проще. Для этого найденным координатам x_1, x_2, \dots, x_k придают некоторые произвольные приращения, рассчитывают значения параметра оптимизации и сравнивают его со значением в стационарной точке. Если полученные значения меньше, чем в стационарной точке, это максимум, если больше, – минимум.

Если стационарная точка выходит за рамки факторного пространства, экстремум ищем на границах последнего.

Если стационарная точка находится внутри факторного пространства, но в ней нет ни максимума ни минимума, экстремум ищем тоже на границе факторного пространства. Для этого вычисляем значение функции на границах и исследуем их на экстремум.

Пример 6.10. Определить минимальную окружную неравномерность шихты на колошнике φ , загруженной бесконусным загрузочным устройством с вращающимся лотком по математической модели $\varphi = 0,35 - 0,51x_1 +$

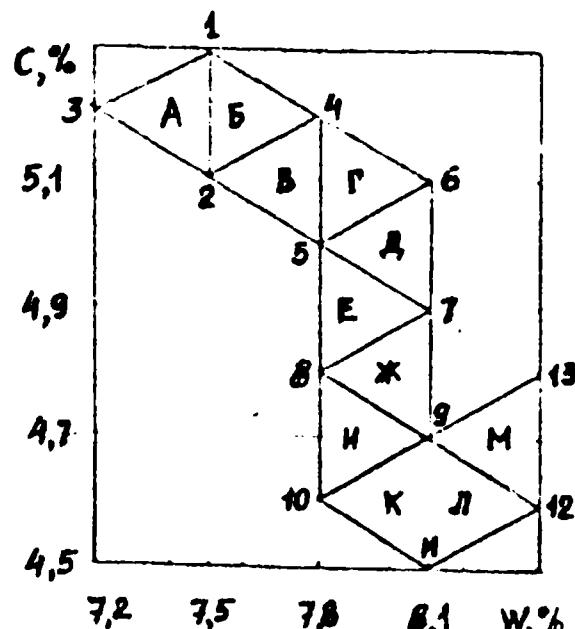


Рис.6.5. Схема движения к оптимуму ПСМ. Буквы на графике обозначают симплексы; цифры – номера опытов

$+ 0,39x_1 + 0,52x_1^2 + 0,03x_2^2 - 0,3x_1x_2$, где x_1 – скорость вращения лотка, изменяющаяся в пределах от -1 до $+1$ об/мин; x_2 – площадь грузового клапана, изменяющаяся в пределах $0,2 \dots 0,52 \text{ м}^2$ от -1 до $+1$ в кодированных координатах.

Найдем частные производные по x_1 и x_2 и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_1} = -0,51 + 1,04x_1 - 0,3x_2 = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_2} = 0,39 + 0,06x_2 - 0,3x_1 = 0.$$

Решим систему уравнений и найдем значения $x_1 = 3,1244$ и $x_2 = 9,1313$.

Определим, минимум или максимум находится в найденной точке. Для этого получим вторые производные $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} = 1,04$; $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} = 0,06$;

$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1 \partial x_2} = -0,3$. Составим дискриминант квадратичной формы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1,04 & -0,3 \\ 0,3 & 0,06 \end{vmatrix} = 1,04 \cdot 0,06 - 0,3^2 = -0,0276.$$

Судя по знаку дискриминанта, в этой точке экстремума нет. Кроме того, найденное значение параметра оптимизации φ лежит вне факторного пространства, значит, минимум будем искать на его границах. Для этого последовательно подставим в уравнения $\frac{\partial \varphi}{\partial x_1}$ значения границ факторов -1 и $+1$, решим эти уравнения, определив, таким образом, наличие минимумов на границе:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_1} = -0,51 + 1,04x_1 - 0,3/-1/ = 0; \quad x_1 = 0,2019;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_1} = -0,51 + 1,04x_1 - 0,3/+1/ = 0; \quad x_1 = 0,7788;$$

$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} = 1,04 > 0$ – минимум;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_2} = 0,39 + 0,06x_2 - 0,3/-1/ = 0; \quad x_2 = 11,5;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_2} = 0,39 + 0,06x_2 - 0,3/+1/ = 0; \quad x_2 = 1,5;$$

$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} = 0,06 > 0$ – минимум.

Итак, на границах $x_1 = -1$ и $x_1 = +1$ минимальные точки соответствуют $x_1 = 0,2019$ и $x_1 = 0,7788$, а на границах $x_2 = -1$ и $x_2 = +1$ эти точки вышли за рамки факторного пространства / $x_2 = -11,5$ и $x_2 = -1,5$, следовательно, неравномерность φ надо рассчитывать только в точках $\varphi_1/x_1 = 0,2019$; $x_2 = -1/$ и $\varphi_2/x_1 = 0,7788$; $x_2 = +1/$:

$$\varphi_1 = 0,35 - 0,51 \cdot 0,2019 + 0,39/-1/ + 0,52/0,2019^2 + 0,03/-1^2 - 0,3 \cdot 0,2019/-1/ = -0,0312;$$

$$\varphi_2 = 0,35 - 0,51 \cdot 0,7788 + 0,39 \cdot 1 + 0,52/0,7788^2 + 0,03/+1^2 - 0,3 \cdot 0,7788 \cdot 1 = 0,4546.$$

Сравниваем полученные результаты и делаем вывод, что минимальная окружная неравномерность соответствует $\varphi_1/0,219; -1/ = -0,03$.

В натуральных координатах φ , 17.8 об/мин; $0.212 \text{ м}^2 / \approx 0$, т.е. при этих значениях скорости вращения лотка и площади грузового клапана неравномерность окружного распределения шихты минимальна.

Металлургическое производство, как правило, многокритериально, так как при выборе наилучшего варианта технологии или конструкции приходится учитывать большое количество различных требований, среди которых встречаются и противоречащие друг другу. Например, факторы загрузки доменной печи одновременно влияют на газопроницаемость шихты и использование газового потока в различном направлении. Для улучшения доменного процесса необходимо, чтобы использование газового потока и газопроницаемость были как можно выше. В этом случае нужно применять компромиссные методы оптимизации. Один из них – метод множителей Лагранжа.

Суть метода заключается в нахождении экстремума новой функции, состоящей из основной и ограничивающих сумм, умноженных на неопределенный множитель Лагранжа (λ). Под ограничивающими функциями подразумеваются зависимости, ограничивающие размеры факторного пространства или значение параметра оптимизации основной функции. Итак, если есть основная функция $\Phi = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и ограничивающие ее $\Phi_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\Phi_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots$, $\Phi_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то можно составить функцию Лагранжа

$$U = \Phi + \sum_{i=1}^n \lambda_i \Phi_i \quad /6.36/$$

и исследовать ее на экстремум, т.е. взять частные производные этой функции по факторам x_1, x_2, \dots, x_n и приравнять их к нулю. Дополним систему уравнений ограничивающими функциями с числовыми значениями $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и решим эту систему уравнений относительно неизвестных $x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Эти значения и являются координатами точки экстремума. Останется только выяснить, максимум или минимум в этой точке. Для этого необходимо взять дифференциал второго порядка и определить вид квадратичной формы.

В технических задачах экстремум функции Лагранжа чаще всего находится вне факторного пространства, следовательно, его определение лишено смысла. Для того чтобы при вычислении не выйти за рамки факторного пространства, необходимо оконтуриТЬ его какой-либо поверхностью в виде эллипса или другой подходящей фигурой и внести его математическую формулу /как еще одно ограничение/ в общую функцию Лагранжа. Тогда оптимальное значение исследуемой функции будет находиться либо внутри области факторного пространства, либо на его границе.

Пример 6.11. На доменных печах объемом 2000 м³ в результате пас-сивного эксперимента получены полиномиальные математические модели влияния факторов загрузки на показатели газопроницаемости η_r и ис-пользования газового потока η_u :

$$\eta_r \cdot 10^{-6} = 101,3 + 3,8h - 8,4M - 312,9\sigma + 251,8\xi - 0,78h^2 + 0,149M^2 + 222,9\sigma^2 - 126,3\xi^2;$$

$$\eta_u = + 6,63 - 0,58h + 1,534M + 11,8\sigma - 10,75\xi - 7,25\sigma^2 + 5,75\xi^2 + 0,112h^2,$$

где h – уровень засыпи, который изменялся в пределах 1,5...2,5 м; M – масса подачи $1M \approx 25...29$ т; σ – показатель радиального распределения шихты конусным загрузочным устройством $1\sigma = 0,7...1,1$; ξ – степень перемешивания шихты при загрузке, $1\xi = 0,6...1,0$.

Найди оптимальные значения факторов загрузки h и M , соответствующие степени использования газового потока $\eta_u = 100 \times CO_2/(CO+CO_2) = 45\%$ и максимальной газопроницаемости системы загрузки ААКК†, $4КААК†/\sigma = 0,9$; $\xi = 0,8$.

Упростим модели, введя в них числовые значения $\sigma = 0,9$ и $\xi = 0,8$, соответствующие выбранной системе загрузки:

$$\begin{aligned}\eta_r \cdot 10^{-6} &= 124,85 + 3,8h - 0,78h^2 - 8,4 \\ \eta_u &= - 1,97 - 0,58h + 1,534M + 0,112h^2.\end{aligned}$$

Составим функцию Лагранжа: $U = 124,85 + 3,8h - 0,78h^2 - 8,4M + \lambda \times (-1,97 - 0,58h + 1,534M + 0,112h^2) - 45/$.

Возьмем частные производные по факторам и приравняем их к нулю, а также добавим ограничительную функцию по использованию газового потока:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial h} &= 3,8 - 1,56h - 0,58\lambda + 0,224M\lambda = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial M} &= -8,4 + 1,534\lambda = 0; \\ -1,97 - 0,58h + 1,534M + 0,112h^2 - 45 &= 0.\end{aligned}$$

Решим полученную систему относительно неизвестных h , M и λ (не-определенный множитель). Получим $h = 1,87$ м; $M = 28,5$ т; $\lambda = 5,47$. Следовательно, при полученных значениях уровня засыпи имеем подачи и системы загрузки ААКК†, $4КААК†$ /газовый поток используется на 45% по $100 \cdot CO_2/(CO+CO_2)$ при максимально возможной газопроницаемости/.

Контрольные вопросы

1. Цели и задачи планирования эксперимента.
2. Последовательность планирования и проведения эксперимента.

3. Что называется планом эксперимента? Чго такое фактор и параметр оптимизации?

4. Что такое обобщенный параметр оптимизации? Какие способы получения обобщенных параметров оптимизации вы знаете?

5. Какими критериями оптимизации руководствуются при выборе вида плана эксперимента?

6. Что такое полный факторный эксперимент? Дробные реплики?

7. Что такое адекватность математической модели? Как она определяется?

8. Для чего отсеиваются факторы?

9. Что является критерием отсевочного эксперимента?

10. По каким критериям определяется однородность дисперсий экспериментов?

11. Какие планы для получения полиномиальных моделей второй степени вы знаете?

12. Какие планы применяются при исследовании системы "состав - свойство"? Их особенность.

13. Какие методы определения адекватности моделей применяются при симплексно-решетчатом планировании эксперимента?

14. Что такое оптимизация? Цель оптимизации технологических процессов.

15. Чем отличается экспериментальная оптимизация технологических процессов от теоретической?

16. Какие методы нахождения оптимума вы знаете?

17. Какие операции включает в себя кругое восхождение по поверхности отклика?

18. Принцип поиска оптимума ПСМ.

19. Последовательность оптимизации по математическим моделям.

20. Как определяется вид экстремума в стационарной точке?

21. Какие методы компромиссной оптимизации вы знаете?

22. Как составляется функция Лагранжа? Суть оптимизации с помощью множителей Лагранжа.

Глава 7. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ

§ 1. Основные методы моделирования

В металлургических агрегатах гидромеханические, тепловые и химические процессы протекают одновременно, что значительно затрудняет изучение их закономерностей. Поэтому наиболее целесообразно, в первую очередь, исследовать определяющие процессы в их совокупности. В ряде

случаев /взаимодействие газов и шлаков с металлом, наполнение изложниц и кристаллизаторов/ решающую роль играют гидроаэромеханические и массообменные процессы, а влияние остальных значительно слабее. Эти процессы проще всего изучать методами моделирования.

Моделирование позволяет сократить сроки разработки и освоения новых процессов, оборудования и агрегатов и тем самым ускорить НТП в металлургии. За последние два-три десятилетия наука о моделировании значительно развивалась как в теоретическом, так и в прикладном направлении. Моделирование используется во многих фундаментальных и практических во всех прикладных науках; его можно определить как метод изучения объектов, при котором вместо оригинала /натуры/ эксперимент проводят на модели, а результаты количественно или качественно распространяют на оригинал. В зависимости от природы измеряемых величин все модели можно разделить на три группы.

1. Физические, у которых природа измеряемой величины, например скорости, такая же, как и в натуре. В этом случае измерение скорости в натуре заменяют измерением скорости на модели.

2. Аналоговые, у которых природа измеряемой величины, например температура, отлична от ее природы в натуре. В этом случае измерение температуры в натуре заменяют измерением электрического потенциала, напора и других параметров на модели. Температура, таким образом, моделируется величинами, имеющими иную физическую природу.

3. Математические, представляющие собой описание изучаемого объекта с помощью математических и логических соотношений и позволяющие выявить характерные свойства моделируемой системы при выполнении определенных математических и логических операций над ее описанием.

Выбор способа моделирования определяется характером решаемой задачи, наличием или возможностью приобретения /создания/ соответствующего оборудования, квалификацией научных кадров. Физическое моделирование чаще используется в тех случаях, когда важно выявить решающие факторы в природе изучаемого процесса или явления. Для аналогового моделирования необходимо иметь соответствующие устройства /гидро- или электронагреватели/. Математическое моделирование дает хорошие результаты при известных математических описаниях объекта в целом или отдельных его частей, наличии современных ЭВМ и математиков-вычислителей достаточно высокой квалификации.

Моделирование, которое обычно проводят в лабораториях, дает возможность варьировать разнообразные факторы в широких пределах, наблю-

дагь, фиксировать и воспроизводить изучаемые явления и, таким образом, с относительно небольшими затратами довольно полно и с разных сторон изучать многие процессы.

§ 2. Основы теории подобия

Основное требование при физическом моделировании – соблюдение возможно более полного подобия процессов на образце /натуре/ и модели. Теория подобия позволяет выполнять моделирование так, что в определенных пределах и с известными допущениями результаты модельных исследований можно распространять на подобные производственные установки. Два явления считаются подобными, если по заданным характеристикам одного можно получить характеристики другого простым пересчетом, который аналогичен переходу от одной системы единиц физических величин к другой. Так, гидромеханические процессы подобны при условии геометрического, кинематического и динамического подобия.

При геометрическом подобии сходственные геометрические элементы подобных фигур или тел пропорциональны /подобны/. Границами параллелепипеда являются плоскости шириной ℓ_1 , толщиной ℓ_2 , высотой ℓ_3 . Два параллелепипеда подобны, если их сходственные размеры также подобны:

$$\frac{\ell'_1}{\ell''_1} = \frac{\ell'_2}{\ell''_2} = \frac{\ell'_3}{\ell''_3} = C_\ell, \quad /7.1/$$

где отношение сходственных размеров называется геометрическим масштабом или масштабом геометрических размеров C_ℓ .

Кинематическое подобие соблюдается в том случае, если в сходственных пространственно-временных точках векторы скоростей v отличаются только постоянным и одинаковым во всей заданной системе скалярным множителем. Аналогично предыдущему можно записать

$$\frac{v'_1}{v''_1} = \frac{v'_2}{v''_2} = \frac{v'_3}{v''_3} = C_v, \quad /7.2/$$

где C_v – масштаб скоростей.

Динамическое подобие соблюдается, если в сходственных пространственно-временных точках векторы объемных сил и тензоры напряжений отличаются лишь постоянным и одинаковым во всей заданной системе скалярным множителем:

$$\frac{F'_1}{F''_1} = \frac{F'_2}{F''_2} = \frac{F'_3}{F''_3} = C_F, \quad /7.3/$$

где C_F – масштаб сил.

В гидромеханических процессах участвуют силы тяжести, инерции, вязкости, давления, поверхностного натяжения и др. Существуют определенные соотношения между векторами скоростей потоков и силами, действующими в них, которые могут быть представлены в виде так называемых критериев подобия – безразмерных /отвлеченных/ чисел, составленных из размерных физических параметров, определяющих рассматриваемое физическое явление. У подобных явлений критерии подобия равны между собой, т.е. имеют одно и то же числовое значение. Большинство критериев названо в честь ученых и обозначается двумя первыми буквами их фамилий; такие критерии именуются числами. Наиболее часто при исследовании гидродинамических явлений используют следующие критерии подобия.

Число Ньютона

$$Ne = \frac{F_c \tau}{m v}, \quad /7.4/$$

/ F_c – сила, Н; τ – время, с; m – масса, кг; v – скорость, м/с / представляет собой отношение импульса силы к количеству движения. Если в /7.4/ подставить значение времени как отношение линейного размера /пути/ к скорости, можно получить другое выражение числа Ньютона

$$Ne = \frac{F_c l}{m v^2}, \quad /7.5/$$

где l – характерный размер тела /для пластины – толщина, для шара или цилиндра – диаметр/, м.

В таком виде число Ньютона является отношением потенциальной энергии к удвоенной кинетической. В связи с тем, что в формулах критериев числовые коэффициенты не указывают, можно считать, что это отношение потенциальной энергии к кинетической. Оба выражения числа Ньютона одинаково широко используют в исследованиях.

Число Фруда

$$Fr = \frac{v^2}{g l} \quad /7.6/$$

/ g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$ / является отношением силы динамического давления к силе тяжести.

Число Эйлера

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho v^2} \quad /7.7/$$

/ ΔP – перепад давлений, Па; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ / представляет собой отношение сил статического и динамического давлений.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{v \rho \ell}{\eta} = \frac{v \rho}{\nu} \quad /7.8/$$

η - динамическая вязкость, Па·с; ν - кинематическая вязкость, m^2/s является отношением сил динамического давления к силе вязкостного трения.

Число Вебера

$$We = \frac{\sigma}{\rho g \ell^2} \quad /7.9/$$

σ - поверхностное натяжение, Н/м/ является отношением силы поверхностного натяжения к силе тяжести. Другое выражение числа Вебера

$$We = \frac{\sigma}{\rho u^2 \ell} \quad /7.10/$$

представляет собой отношение силы поверхностного натяжения к силе динамического давления.

Число Архимеда

$$Ar = \frac{g \ell^3}{\nu^2} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \quad /7.11/$$

является отношением архимедовой силы, возникающей при погружении среды с плотностью ρ_2 в среду с плотностью ρ_1 , к силе вязкостного трения.

Число Маха

$$M = \frac{v}{c} \quad /7.12/$$

v - скорость звука, м/с/ представляет собой отношение скорости геля /среды/ к скорости звука.

Критерий гомохронности /одинакового времени/

$$H_o = \frac{v \tau}{\rho} \quad /7.13/$$

характеризует время протекания нестационарных процессов.

Кроме указанных, существуют критерии, описывающие тепло- и массообменные, физико-химические и другие процессы.

Для моделирования какого-либо процесса и масштабного пересчета величин с образца на модель и обратно необходимо правильно определить конкретный вид и количество критериев подобия. Эта задача может быть решена несколькими методами. Наиболее часто используют теорию размерностей /Л-теорема Букингема/ и приведение уравнений к безразмерному

виду. Они описаны во многих источниках, посвященных теории подобия и физическому моделированию. Чтобы обеспечить подобие при физическом моделировании, необходимо соблюдать равенство всех критериев подобия в натуре и на модели, условие которого записывают следующим образом:

$$Re = idem^*; \quad Fr = idem; \quad We = idem \quad /7.14/$$

и т.д.

§ 3. Физическое моделирование

Во всех случаях физическое моделирование начинают с расчета модели, определения ее масштаба и других параметров, обеспечивающих подобие процессов на натуре и модели. Однако практика показывает, что во многих случаях выдержать равенство критериев подобия на образце и модели очень трудно или даже невозможно. Тогда прибегают к приближенному моделированию, при котором обеспечивается подобие наиболее существенных величин, определяющих характер изучаемого явления. В этом случае используют свойство автомодельности. Процесс называют автомодельным по данному критерию, если изменение его характеристик не зависит от указанного критерия или его влияние несущественно.

Следовательно, для построения модели необходимо установить, какие критерии в данном процессе или явлении будут основными, а какими можно пренебречь. Основные критерии, а следовательно, и масштабы модели выбирают в каждом конкретном случае исходя из основных физических закономерностей изучаемого явления. Например, установлено, что для процесса разливки стали должны быть соблюдены равенство чисел Re , We , Fr на образце и модели и геометрическое подобие.

При движении жидкости в закрытых каналах /сталеразливочные стаканы, сифонные проводки/ поверхность явления играют незначительную роль; такие процессы автомодельны по числу Вебера.

При истечении струи из насадка могут быть два режима: ламинарный / $Re < 2 \cdot 10^3$ /, или турбулентный / $Re > 1 \cdot 10^4$ /. На скорость выхода струи из насадка, кроме его формы и статического давления, влияет также коэффициент трения жидкости о стенки насадка. При числе Рейнольдса выше некоторых значений коэффициент трения λ /рис.7.1/ зависит только от показателя шероховатости канала δ , т.е. в области A движение жидкости автомодельно относительно числа Рейнольдса.

Таким образом, для рассматриваемого случая при некоторых значениях числа Рейнольдса /обеспечивающего независимость коэффициента гра-

* Символ *idem* в переводе на русский язык обозначает "то же самое"

ния/ наиболее существенными величинами, определяющими процесс, будут числа Вебера и Фруда. Масштаб модели следует находить из условия равенства критериев, содержащих показатели свойств жидкостей натурального и модельного процессов, т.е. числа Вебера:

$$\frac{\sigma_M}{\rho_M g_M \ell_M^2} = \frac{\sigma_N}{\rho_N g_N \ell_N^2}, \quad /7.15/$$

где индекс *M* относится к модели, а *N* - к натуре.

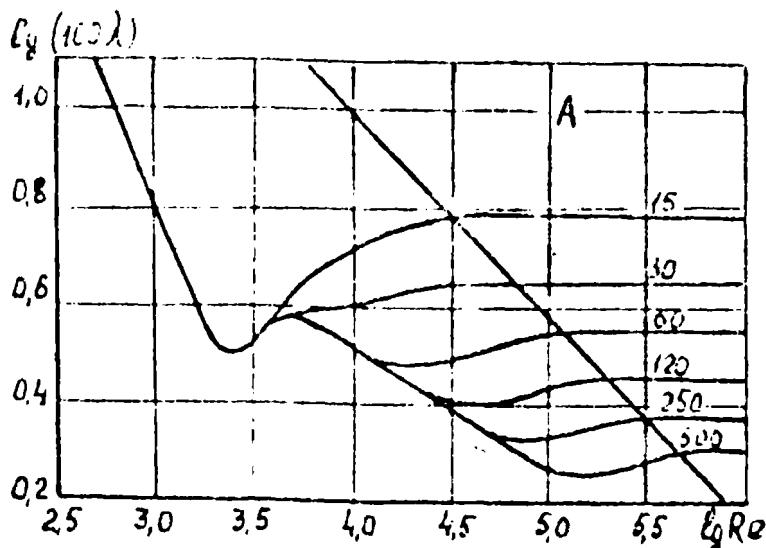


Рис.7.1. Зависимость коэффициента трения от числа R_e при различных r/δ /цифры у точек/

Преобразовав /7.15/, получим

$$C_p = \frac{C_M}{C_N} = \sqrt{\frac{\sigma_M \rho_N g_N}{\sigma_N \rho_M g_M}}. \quad /7.16/$$

При моделировании процесса разливки стали водой можно принять, что $\sigma_N = 1,4 \text{ Н/м}$; $\sigma_M = 0,072 \text{ Н/м}$; $\rho_N = 7000 \text{ кг/м}^3$; $\rho_M = 1000 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения для натуре и модели одинаково. После подстановки числовых значений в выражение /7.16/ получим масштаб модели, равный приблизительно 0,6.

Масштаб скоростей определяют из условия равенства чисел Фруда на модели и образце:

$$C_v = \frac{v_M}{v_N} = \sqrt{\frac{g_M \ell_M}{g_N \ell_N}} = \sqrt{\frac{\ell_M}{\ell_N}} = \sqrt{C_p}. \quad /7.17/$$

В данном случае $C_p = 0,775$. Далее следует установить границу автомодельности процесса относительно числа Рейнольдса. Согласно

рис.7.1 коэффициент сопротивления гравитации не зависит от числа Рейнольдса для относительного показателя переноса гостя $\ell/\delta = 40$ при $Re = \frac{U\ell}{\nu} > 1 \cdot 10^4$ или $U > 1 \cdot 10^4 \frac{\nu}{\ell}$.

Например, при скорости истечения на модели $U = 2$ м/с и вязкости воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с минимальный диаметр насадка на модели $\ell = 0,005$ м. Моделировать процессы наполнения изложниц сверху при диаметрах насадка /стакана/ на модели меньших 0,005 м без грубых нарушений подобия процессов невозможно.

При моделировании нестационарных процессов масштаб времени определяют из равенства критериев гомохронности на модели и в натуре /образце/:

$$C_T = \frac{\tau_M}{\tau_N} = \frac{U_N \ell_M}{U_M \ell_N} = \frac{C_U}{C_V}. \quad /7.18/$$

Для данного случая $C_T = 0,775$.

Аналогично находят условия подобия для других процессов. При этом важно учесть все факторы процесса, а также установить основные, наиболее существенные критерии подобия. Это возможно прежде всего в тех случаях, когда установлен механизм исследуемых процессов.

После определения основных параметров модели приступают к ее изготовлению. Модели выполняют из самых разнообразных материалов, чаще всего из органического стекла, обладающего высокой прозрачностью и легко обрабатываемого. При этом необходимо обеспечивать геометрическое подобие границ пространства, в котором протекают исследуемые процессы. Так, при моделировании разливки должно быть соблюдено подобие профиля канала стакана, внутреннего профиля и сечения изложницы, при моделировании процессов движения газов – подобие внутренних параметров газоходов и т.д.

Моделированием можно исследовать различные процессы, что в значительной мере определяет характер его проведения и применяемую аппаратуру. Чаще всего используют следующие методы получения информации о моделируемом процессе.

Визуальное наблюдение применяют для выявления, главным образом, качественной картины процесса и внешнего его хода. При визуальном наблюдении можно проводить хронометраж.

Измерение линейных величин, характеризующих процесс. Этим методом измеряют характеристики процесса, имеющие размерность длины /глубина проникновения струи, высота распространения брызг, размеры кратера при продувке и др./. Для лучшей их фиксации на стенки модели наносят сетки или устанавливают в необходимых местах линейки с делениями.

Фото – и киносъемки применяют при изучении некоторых быстротекущих /особенно нестационарных/ процессов. Существенное значение при этом имеет правильное освещение объекта исследования, позволяющее зафиксировать изучаемые явления. Количественные данные о многих быстротекущих процессах могут быть получены обработкой кадров киносъемки.

Метод плавающих индикаторов /трассеров/ дает возможность наблюдать качественную картину циркуляции жидкости в модели и в ряде случаев устанавливать некоторые количественные закономерности. Трассеры должны иметь плотность, близкую /лучше равную/ к плотности моделирующей жидкости, и быть хорошо видимыми в ее потоках. При использовании в качестве моделирующей жидкости воды или водных растворов с плотностью, близкой к $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, в качестве трассеров можно применять алюминиевую пудру, кристаллы нафталина, шарики из невспученного полистирола, спагетти чай и другие удобные для этого материалы. Трассы от движущихся индикаторов фиксируют с помощью фото- и киносъемки. Для выделения исследуемой зоны в объеме жидкости ее следует освещать плоскопараллельным пучком света, так называемым "оптическим ножом". В простейшем случае "оптический нож" может быть образован с помощью луча из диапроектора, проходящего через щелевую диафрагму. Для получения точных интервалов времени фотосъемку следует производить через диск с прорезью – обтюратор, вращающийся с известной скоростью. В этом случае на снимках следы трассеров отмечаются в виде светлых или темных черточек. Зная интервалы времени, обеспечиваемые обтюратором, и длины трасс, можно рассчитать скорости потоков в выбранном месте.

Использование трубок Пито. Этот метод позволяет измерять скорости потоков моделирующей жидкости в точно определенных местах. Применяются двусторонние трубы Пито, подключенные к U-образному перевернутому манометру. При этом трубы, соединительные шланги и нижняя часть манометра заполнены жидкостью, а верхняя часть – воздухом. Для удобства работы в верхней части изгиба трубы манометра делается отросток, соединяющий манометр с атмосферой. После засасывания жидкости в манометр до требуемого уровня этот отросток перекрывают краном, изолирующим его от атмосферы. Отсчет производят по разности уровней жидкости в коленях манометра. Трубы предварительно градуируют в потоках жидкости с известными скоростями. Этот метод позволяет получать достаточно точные количественные результаты.

Измерение электропроводимости моделирующей жидкости используют при изучении влияния гидродинамических параметров на процессы массообмена. В этом случае либо применяют готовые растворы различных электро-

литов, либо исследуют растворение веществ, делающих жидкости электропроводимыми. Для измерений в моделирующую жидкость вводят попарно небольшие электроды, между которыми создается электрический потенциал. Если растворенное вещество появляется в месте установки электродов, между ними начинает протекать ток. Измеряя силу тока, можно определить концентрацию растворенного вещества в этом месте. При изучении быстродействующих процессов в качестве регистрирующих приборов следует применять быстродействующие самопищающие потенциометры или шлейфовые осциллографы.

Приступая к моделированию, необходимо составить план эксперимента, учитываящий проведение опытов при различных значениях факторов, оказывающих влияние на исследуемый параметр. Для этого выбирают все величины, входящие в критерий подобия, определяющие данный процесс. Например, разрушение струи жидкости стали зависит от чисел Рейнольдса, Фруда и Вебера. Характеристикой разрушения /исследуемым параметром/ является отношение амплитуды возмущений на струе ϵ к ее диаметру при выходе из насадка d , которое в общем виде можно записать так:

$$\frac{\epsilon}{d} = f(Re, Fr, We). \quad /7.19/$$

В указанные критерии входят такие факторы, как скорость струи на выходе из насадка, вязкость, плотность и поверхностное натяжение жидкости. Характерным линейным размером для всех критериев является диаметр насадка на выходе. Следовательно, должны быть проведены опыты при варьировании величин всех указанных факторов для всех их возможных сочетаний. Чтобы повысить точность искомой связи, при каждом сочетании величин факторов необходимо провести несколько опытов.

По окончания эксперимента вычисляют значения критериев для каждого опыта и определяют вид функциональной связи. Чаще всего используют степенные функции вида

$$\frac{\epsilon}{d} = B Re^{\alpha} Fr^{\beta} We^{\gamma}, \quad /7.20/$$

где B - числовой коэффициент; α, β, γ - показатели степени при соответствующих критериях.

Для их определения выражение /7.20/ с помощью логарифмирования приводят к линейному виду:

$$\lg \frac{\epsilon}{d} = \lg B + \alpha \lg Re + \beta \lg Fr + \gamma \lg We. \quad /7.21/$$

Выражение 7.21 может быть записано так:

$$y = b_0 + a x_1 + b x_2 + c x_3, \quad 7.22$$

где y , b_0 , x_1 , x_2 , x_3 - логарифмы соответственно $\frac{\epsilon}{d}$, B , Re , Fr , We .

Все коэффициенты этого уравнения могут быть найдены методами множественной корреляции и подставлены в исходное уравнение 7.20. Полученная зависимость называется критериальной или представлена в обобщенных координатах и во многих случаях наиболее удобна для выражения экспериментальных связей, а также для переноса данных моделирования на природу.

§ 4. Аналоговые модели

Если тепло- или массообменные процессы, особенно сопровождающиеся фазовыми переходами /плавлением, затвердеванием, испарением/ или изменением физических свойств веществ, имеют сложный характер, а некоторые условия на границах сред неизвестны, можно исследовать эти процессы методами аналогового моделирования. Такие методы основаны на формальной аналогии уравнений теплопроводности, электропроводности и течения жидкости в капиллярных каналах. При этом изучают передачу не теплоты, а электрического тока или течение жидкости и измеряют не температуру в природе, а электрический потенциал или напор на модели. Температура моделируется величинами, имеющими другую физическую природу. Такие модели относятся к классу аналоговых и для работы с ними необходимы специальные установки, а иногда и специально оборудованные лаборатории. В табл.7.1 приведены теплофизические величины и соответствующие им модельные параметры.

Уравнение теплопроводности /уравнение Фурье/ для плиты при одномерном распространении теплоты может быть записано так:

$$C_{00} \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad 7.23$$

Соответствующее уравнение передачи электрического тока имеет вид

$$C_{00} \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{r_{y0}} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad 7.24$$

Течение жидкости в капиллярах /уравнение Пуазейля/ описывается уравнением

$$C_r \frac{\partial h_r}{\partial z} = \frac{1}{\zeta} \frac{\partial^2 h_r}{\partial x^2}. \quad 7.25$$

Таблица 7.1

Тепловая модель		Электрическая модель		Гидравлическая модель	
Обозна- чение	Физическая ве- личина, единица	Обозна- чение	Физическая ве- личина, единица	Обозна- чение	Физическая ве- личина, единица
T	Температура, К	U	Электрический потенциал, В	h_r	Напор, м
c_{as}	Объемная теплоемкость, Дж/(м ³ ·К)	C_{as}	Объемная электрическая ёмкость, Ф/м ³	C_r	Гидравлическая ёмкость, м ³ /м ³
τ	Время, с	τ	Время, с	τ	Время, с
x	Переменная координата, м	x	Переменная координата, м	x	Переменная координата, м
λ	Теплопроводность, Вт/(м·К)	r_{ud}	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	ζ	Гидравлическое сопротивление, с/м ²
q	Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м ²	J	Сила электрического тока, А	V	Объемный расход, м ³ /с

Для стационарных процессов в однородных средах уравнения /7.23-/7.25/ упрощаются и принимают вид

$$q = \frac{\lambda}{S} \Delta T; \quad J = \frac{\Delta U}{\tau}; \quad V = \frac{\Delta h_r}{\zeta},$$

где Δ - разность соответствующих величин; S - толщина плиты; τ - электрическое сопротивление.

Для моделирования методом электротепловой аналогии используют электроинтеграторы. В общем виде электроинтегратор представляет собой набор электроопротивлений и электроёмкостей /рис.7.2, а, б/. Некоторые конструкции электроинтеграторов, например ЭИДА 9/60, пригодны для моделирования на сплошных проводящих средах; такие модели применяют, в основном, для исследования установившихся тепловых процессов в твердом теле. Проводящей средой чаще всего служат жидкие электролиты и электропроводная бумага. Модели, в которых используют наборы сопротивлений и иногда ёмкостей, называются сеточными, например электроинтегратор ЭИ-12. С их помощью можно решать одно- и двумерные задачи. Применение сеточных моделей основано на замене исследуемого поля, все параметры которого /масса, теплопроводность, теплоемкость/ непрерывно распределены в пространстве полем с сосредоточенными /в узлах сетки/ параметрами.

На таких моделях изучают как установившиеся, так и неустановившиеся тепловые процессы. Используя специальные приемы моделирования, воспроизводят также процессы установившегося теплопереноса в потоке жидкости или газа.

Гидроинтегратор представляет собой систему призматических, вертикально расположенных сосудов, соединенных каналами, обеспечивающими ламинарное течение жидкости /рис.7.2,в/. Современные гидроинтеграторы, например ИГ-2, позволяют решать одно- и двумерные задачи стационарной и нестационарной теплопроводности, включая процессы с фазовыми превращениями. К недостаткам гидроинтеграторов относятся громоздкость, сложность и трудоемкость обслуживания. При решении задач с помощью интеграторов необходимо определить масштабы исследуемых параметров процесса. Подробные описания устройств интеграторов и методики работы с ними можно найти в инструкциях по их использованию и в специальной литературе.

С развитием методов вычислительной математики и расширением использования ЭВМ аналоговое моделирование постепенно сокращается.

§ 5. Математическое моделирование металлургических процессов

Математическое моделирование дает возможность изучить объект исследования или его часть в широком диапазоне граничных условий. Оно позволяет сократить сроки исследования и поставить такие эксперименты, которые по причинам, связанным, например, со снижением производительности агрегатов, ухудшением качества продукции, высокими материальными затратами нецелесообразно проводить на производственном оборудовании.

Во многих случаях модель не тождественна изучаемой системе /агрегат, процесс и т.п./, так как в процессе создания она сознательно упрощалась. При разработке модели невозможно учесть влияние на систему всех факторов, потому что некоторые из них носят случайный характер и

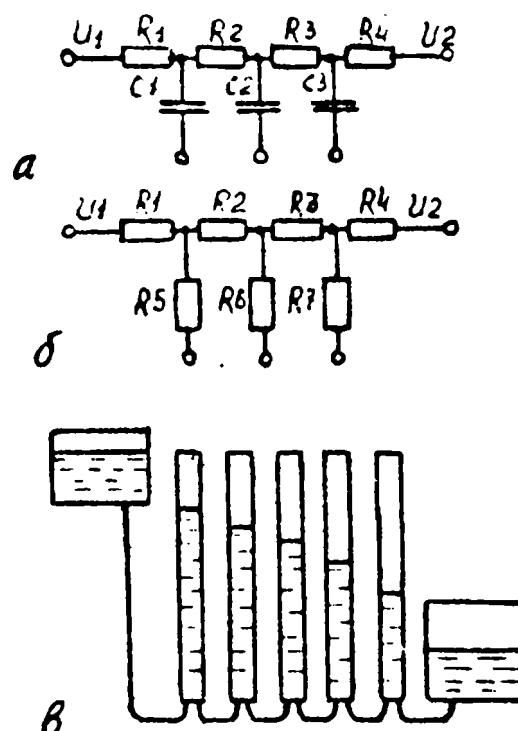


Рис.7.2. Схемы аналоговых моделей: а - электроинтегратор с $R-C$ элементами; б - электрический интегратор с $R-R$ элементами; в - гидроинтегратор

их влияние малопредсказуемо. Математическая модель представляет собой формальное описание изучаемой системы с помощью математических и логических соотношений. Она позволяет выявить характерные свойства моделируемой системы при проведении математических и логических операций над ее описанием.

Существуют такие основные виды математических моделей: детерминированная, составленная из соотношений, основанных на физико-химической природе процесса; статистическая, базирующаяся на зависимостях, полученных методами математической статистики; статическая, рассматривающая связь между начальными и конечными состояниями системы; динамическая, описывающая изменения состояний системы во времени. Сложность модели, ее структура и объем в первую очередь определяются задачами, стоящими перед исследователями, наличием соответствующих технических средств и ЭВМ.

Методами математического моделирования в металлургии решают разнообразные по характеру и сложности задачи, из которых необходимо отмечать следующие.

1. Изучение различных теплофизических, физико-химических и других процессов, например, окислительно-восстановительных реакций, протекающих при выплавке чугуна и стали, процессов тепло- и массообмена в агрегатах.

2. Исследование технологического процесса в целом – плавок в кислородном конвертере, мартеновской, двухванной или электрической печах.

3. Моделирование и расчет основных конструктивных параметров агрегатов или их узлов, например, кислородного конвертера, фурм и др.

4. Изучение работы производственных систем – отдельных металлургических агрегатов, цехов и завода в целом.

В каждом конкретном случае решаются задачи различной сложности – от имитации работы одного узла и нахождения оптимальных условий проведения отдельных операций до создания систем управления технологическим процессом, агрегатом, цехом или заводом в целом.

Общая схема создания математической модели и проведения на ней исследований состоит из таких этапов.

1. Постановка задачи – определение цели и возможной области применения результатов моделирования. В частности, при моделировании технологического процесса целями могут быть его оптимизация по какому-либо параметру, например, по расходу шихтовых материалов; сопоставление вариантов технологии; изучение возможности использования новых материалов и др. В зависимости от целей планируют возможные упрощения при составлении модели системы.

2. Описание моделируемой системы. При моделировании технологического процесса его математически описывают системой дифференциальных или алгебраических уравнений и логическими соотношениями. За основу берут уравнения материального и энергетического балансов, построенные с учетом теории процесса, его физико-химических закономерностей, эмпирических или критериальных зависимостей, корреляционных связей между отдельными параметрами и т.д.

3. Выбор метода решения задачи и подготовка к решению. Так как математическое моделирование выполняют чаще всего с помощью ЭВМ, то на этой стадии разрабатывают алгоритм решения, отлаживают программу. Затем уточняют модель и выявляют ошибки, возникшие при программировании, для чего рекомендуется предусмотреть в программе выдачу результатов промежуточных расчетов, что значительно облегчает отыскание ошибок.

4. Вычислительный эксперимент. Он включает в себя два этапа: предварительный, в ходе которого изучают адекватность модели объекту моделирования, и основной, когда решают поставленную в исследовании задачу. Адекватность модели проверяют по известным результатам работы объекта. Если обнаруживается существенное расхождение, то модель корректируют: вводят дополнительные связи, уточняют эмпирические коэффициенты и совершенствуют ее до тех пор, пока не будет достигнута требуемая сходимость результатов.

5. Анализ результатов – заключительный этап моделирования. Полученные данные представляют в виде графиков и при необходимости обрабатывают методами математической статистики. По результатам моделирования разрабатывают рекомендации для проверки и внедрения на изучаемом объекте, а также рассматривают возможности дальнейших исследований. Ценность результатов, получаемых при математическом моделировании, в значительной степени определяется правильным выбором физической или физико-химической модели процесса.

Для математического моделирования применяются аналоговые и цифровые ЭВМ.

§ 6. Моделирование на АВМ и программируемых микрокалькуляторах

Особенность работы аналоговых вычислительных машин /АВМ/ – их высокое быстродействие, выдача решения одновременно с включением машины в режим интегрирования, наглядность получаемого результата, возможность раннего обнаружения ошибок в программе или в исходных данных, что дает возможность приостановить решение и ввести корректировки. АВМ позво-

ляет выбрать наилучший временной масштаб процесса. Эти особенности обусловливают использование их для моделирования динамических систем и в качестве основы различного рода тренажеров и обучающих машин. АВМ третьего поколения типа АВК-З1, АВК-З2 обеспечивают высокую точность вычислений /около 0,1%/.

В основу моделирования на АВМ положен принцип математического подобия, основанный на том, что различные физические процессы и явления могут быть описаны одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями: кинетика химических реакций – линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями первого и более высоких порядков с постоянными переменными коэффициентами; процессы гидродинамики и тепло- и массообмена – дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных. Различие математического описания в каждом конкретном случае связано со значениями коэффициентов, начальными и граничными условиями.

Можно выделить два подхода к моделированию на АВМ:

моделирование решения математического описания объекта исследования в виде систем дифференциальных уравнений. Основу данного подхода составляет математический изоморфизм /подобие уравнений/;

метод прямой аналогии, основанный на подобии формального описания электрических, гидродинамических, тепло- и массообменных процессов. Основу такого моделирования составляет физическая постановка задачи, ее анализ и синтез по отдельным частям /см. § 4/.

В первом случае на АВМ, комбинируя различные операционные блоки, набирают электрическую схему, которая описывается такими же по форме дифференциальными уравнениями, как и исследуемый объект. Вводят масштабные преобразования, с помощью которых неэлектрические параметры изучаемой системы /концентрации, скорости потоков, коэффициенты теплопроводности, диффузии и т.д./ заменяются соответствующими параметрами электрической схемы /напряжением, силой тока, сопротивлением, емкостью и т.д./, и устанавливают коэффициенты передачи решающих блоков. Измеряя непрерывно напряжение постоянного тока на выходе соответствующих операционных блоков, получают решение, которое описывает в соответствующем масштабе поведение реального исследуемого объекта.

В качестве примера моделирования рассмотрим решение на АВМ линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами /физическая интерпретация задачи в данном случае не обязательна/:

$$d^2y/dt^2 + \alpha_1(dy/dt) + \alpha_0 y = \beta_0 f(t); \quad 17.26/$$

коэффициенты $\alpha_1 = 2$, $\alpha_0 = 1$, $\beta_0 = 1$; начальные условия: $y_0 = 10$, $y'_0 = 20$, $y''_0 = -40$; вынуждающая функция $f(t) = 10$. Необходимо получить решение в виде графиков /таблиц/ функций $y = y(t)$, $y' = y'(t)$, $y'' = y''(t)$.

Запишем исходное уравнение /7.26/ относительно старшей производной, приведя его к виду, удобному для общего метода программирования;

$$y''(t) = -\alpha_1 y'(t) - \alpha_0 y + \beta_0 f(t), \quad 17.27/$$

и заменим в нем исходные переменные через машинные, преобразовав его в эквивалентную систему:

$$\begin{aligned} U_{y''}(t) &= -K_1 U_{y'}(t) - K_0 U_y(t) + K f(t); \\ U_{y'}(t) &= -K_2 \int_0^t U_{y''}(t) dt; \\ U_y(t) &= -K_3 \int_0^t U_{y'}(t) dt. \end{aligned} \quad 17.28/$$

Структурная схема по уравнениям /7.28/, содержащая сумматор № 1 и два интегратора № 5, 6, показана на рис.7.3.

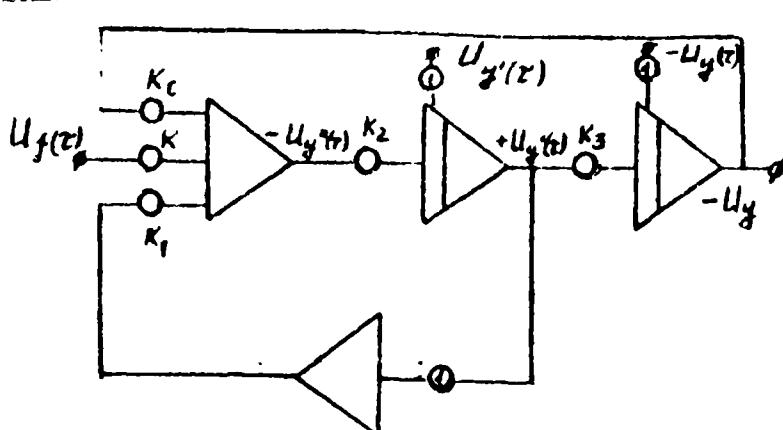


Рис.7.3. Структурная схема аналоговой модели решения дифференциального уравнения

Масштабные коэффициенты, связывающие переменные исходного /7.27/ и машинного /7.28/ уравнений, определяют из соотношений

$$M_y = y/U_y; M_{y'} = y'/U_{y'}; M_{y''} = y''/U_{y''}; M_f = f/U_f; M_t = t/\tau. \quad 17.29/$$

Коэффициенты передачи для структурной схемы на рис.7.3 рассчитываются так:

для сумматора № 1

$$K_1 = \alpha_1 (M_{y'}/M_{y''}); \quad K_0 = \alpha_0 (M_y/M_{y'}); \quad K = \beta_0 (M_f/M_{y''});$$

для интегратора № 5

$$K_2 = M_t (M_{y''}/M_{y'});$$

для интегратора № 6

$$K_3 = M_t (M_{y'}/M_y).$$

Значения масштабных коэффициентов зависят от выбора значения машинной переменной. Ее первоначально устанавливают произвольно, а затем уточняют после первого пробного решения на АВМ. Так как общий характер решения априори неизвестен и переменная может как увеличиваться, так и уменьшаться относительно начального значения, рекомендуется принимать начальные значения машинных переменных в середине рабочего диапазона напряжений аналоговых машин. Если максимальное значение переменной известно, например, на основании геометрических, технологических или других положений, оптимальный масштаб устанавливается сразу.

Для рассматриваемого примера выбираем предварительный масштаб коэффициентов, исходя из следующих начальных условий: $y_0 = 10$, $y'_0 = 20$, $y''_0 = -40$. Максимальное абсолютное значение имеет вторая производная.

В первом приближении выбираем масштаб переменных из условий $M^{(1)} = y^{\Pi}(0)/0,5 U_{max}$, $M^{(1)} + (40/0,5 \cdot 100) = 0,8 B^{-1}$; $M^{(1)} = M_y = M_{y'} = M_{y''}$ и масштаб времени $M_t = 1$.

Величина внешнего воздействия постоянна во времени, поэтому $f_{max} = f(t) = 10$ и оптимальный масштаб $M_{f,opt} = 10/100 = 0,1 B^{-1}$. Затем рассчитываем коэффициенты передачи решающих элементов: $K_0 = \alpha_0 = 1$; $K_1 = \alpha_1 = 2$; $K_2 = 1$; $K_3 = 1$; $K = 0,125$. При этих условиях выполняют пробное решение дифференциального уравнения /7.28/ на АВМ, на основании которого уточняют масштабы переменных.

Таблица 7.2

Первое пробное решение. Масштабы: $M_t^{(1)} = 1$,
 $M_y = M_{y'} = M_{y''} = 0,8 B^{-1}$; $M_{f,opt} = 0,1 B^{-1}$

t ,	с	0	1	2	3	4	5
$-U_y$,	В	-12.5	-22.5	-19.0	-16.5	-15.0	-9.0
$U_{y'}$,	В	25.0	0	-3.5	-2.5	-1.3	0.5
$-U_{y''}$	В	50	8	0	-1.3	-1.0	-0.5

В соответствии с этим решением максимальные значения $y'(t)$ и $y''(t)$ равны их начальным значениям, а максимум $y(t)$ находится в интервале машинного времени $0 \leq t \leq 2$ с и $(U_y)_{max} \approx 25$ В.

Для уточнения значения максимума замедляем решение, для чего устанавливаем новый масштаб времени $M_t^{(2)} = 0,5$. Масштабы величин M_y , M_y' , M_y'' остаются прежними. Изменение масштаба времени вызывает изменение коэффициентов передачи на интеграторах № 5 и 6: $K_2^{(2)} = 0,5$ и $K_3^{(2)} = 0,5$.

Выполняется второе пробное решение /табл. 7.3/ при масштабах величин $M_y = M_y' = M_y'' = 0,8 \text{ В}^{-1}$; $M_{f,\text{опт}} = 0,1 \text{ В}^{-1}$; $M_t = 0,5$, по данным которого устанавливаем значение $(U_y^{(2)})_{\max} = 23,0 \text{ В}$ и определяем максимальное значение

$$|U_{y,\max}| = |U_y^{(2)}| M_y = 23 \cdot 0,8 = 18,4 \text{ В.}$$

Таблица 7.3

τ , с	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$-U_y$, В	-12.5	-20.5	-22.1	-21.0	-19.5	-18.0	-16.5	-15.5	-13.0
U_y' , В	25.0	8.0	0	-2.8	-3.4	-3.0	-2.4	-1.8	-1.3
$-U_y''$, В	50.0	23.5	9.5	2.8	0	-1.0	-1.1		

Вычисляем масштабные коэффициенты второго приближения, которые можно считать оптимальными / $M_{y,\text{опт}} = 0,184$; $M_{y',\text{опт}} = 0,2$; $M_{y'',\text{опт}} = 0,4$; $M_t = 0,5$; $M_{f,\text{опт}} = 0,1$ / и новые коэффициенты передачи решают элементов / $K = 0,25$; $K_0 = 0,46$; $K_1 = 1$; $K_2 = 1$; $K_3 = 0,543$. С этими данными получаем окончательное решение /табл. 7.4/.

Таблица 7.4

τ , с	0/0*	1/0.5	2/1.0	3/1.5	4/2.0	6/3.0	8/4.0	10/5.0
U_y , В	<u>9.99</u>	<u>16.1</u>	<u>17.48</u>	<u>16.93</u>	<u>15.64</u>	<u>13.62</u>	<u>12.14</u>	<u>11.41</u>
U_y' , В	<u>100*</u>	<u>31</u>	<u>0.8</u>	<u>-10</u>	<u>-12.5</u>	<u>-9</u>	<u>-5</u>	<u>-2.5</u>
U_y'' , В	<u>20</u>	<u>6.2</u>	<u>0.16</u>	<u>-2.0</u>	<u>-2.5</u>	<u>-1.8</u>	<u>-1.0</u>	<u>-0.5</u>
U_y , В	<u>100*</u>	<u>45</u>	<u>18</u>	<u>6</u>	<u>0</u>	<u>-2.2</u>	<u>-1.6</u>	<u>-0.9</u>
U_y' , В	<u>-40</u>	<u>-18</u>	<u>-7.2</u>	<u>-2.4</u>	<u>0</u>	<u>0.88</u>	<u>0.64</u>	<u>0.36</u>

* Значения переменных в числителе - машинные, в знаменателе - натуральные величины.

На АВМ рассчитывают сложные металлургические системы. Так, Ю.М.Максимов, И.М.Рожков и М.А.Саакян на АВМ МН-17М моделировали технологические процессы в кислородном конвертере и двухванной печи.

Перспективно использование для математического моделирования программируемых микрокалькуляторов типа БЭ-34, МК-52, МК-54, МК-61 и др.,

имеющих 14-15 регистров памяти и позволяющих реализовать программу расчета на 98-105 шагов. Для них имеется хорошее программное обеспечение [8]. Это позволяет моделировать такие процессы, как распределение примесей между металлом и шлаком, некоторые задачи тепло- и массообмена в металлургических агрегатах и ряд других задач, связанных с решением алгебраических и дифференциальных уравнений, систем уравнений.

В качестве примера приведена программа решения системы из $n = 4$ уравнений:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \dots a_{1n} \\ \dots & \dots \dots \\ a_{nn} & a_{n2} \dots a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad /7.30/$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ определяется методом оптимального исключения переменных.

Ввод исходных данных $n = P0$, коэффициентов $a_{ij} = PX$, $a_{i,j+1} = P\bar{X}$ осуществляется построчно, без учета вывода промежуточных результатов. Ввод каждого коэффициента завершается нажатием клавиш С/П.

Вывод результатов в регистр X из регистров памяти $X_i = PD$:

$$X_2 = PC; X_3 = PB; X_4 = PA.$$

II4	I	4	II2	III0	III	C/П	III4	+	KП2
FL1	06	I	4	P3	III0	PI	FL1	23	KИП3
C/П	БП	I9	Cx	KП2	FL1	24	KП2	ИП0	ИП2
+	PI	II2	ИП3	-	Fx=0	42	C/П	ИП	84
БП	28	KИЮ	ИП0	P3	C/П	KИП2	-	П4	C/П
KИП2	-	ИП4	+	KП1	FL3	49	ИП1	ИП0	+
P3	I	4	PI	P2	KИП1	I-I	ИП	84	ИП3
+	P3	ИП1	-	Fx=0	65	ИП0	PI	KИП3	KП2
FL1	78	БП	I2	ИЮ	Xу	↑	KИП3	X	KИП1
+	KП2	F,	F10	86	F,	II0	B/O		

Приведенная программа использована для решения системы из трех уравнений ($n = 3$)

$$\begin{bmatrix} 4 & 0,24 & -0,08 \\ 0,09 & 3,0 & -0,15 \\ 0,04 & -0,08 & 4,0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 \\ 9 \\ 20 \end{bmatrix}. \quad /7.31/$$

Получены $X_1 = 1,9091983$; $X_2 = 3,1949644$; $X_3 = 5,0448073$. Время счета около 2 мин.

В данном случае моделирование будет заключаться в изменении значений коэффициентов в системе уравнений в соответствии с физическим смыслом задачи и определении значений X_i в различных условиях.

Возможности микрокалькулятора можно показать на рассмотренном примере линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами [см. /7.26/].

Приведем решение уравнения методом Рунге – Кутта по программе:

В/О	З	+	П9	ПВ	ИПС	З	+	П8	ПА
С/П	ИП	27	ПП	23	ИП	45	ИП	27	ИПВ
ИПА	ИП	38	ИПС	ИП?	+	П6	ПП	54	ИП?
х	П4	ИПВ	ИП?	х	П5	ИП9	ИП8	ИП5	+
ПА	ХУ	ИП4	+	ПВ	ИПС	ИП5	+	ПС	ИПД
ИПЧ	+	ПД	В/О	В/О

Начальные условия вводят в следующие регистры памяти: $X_{(0)} = P6$; $3y_{(0)} = PC$, $3y'_{(0)} = PD = PX$; шаг $h/2 = PI$. Вместо многоточия записывают программу расчета исходного уравнения относительно производной высшего порядка с учетом размещения по регистрам памяти $y'' \rightarrow PX$ при $X \rightarrow P6$; $y \rightarrow PA$; $y' \rightarrow PV$. Для исходного уравнения /7.26/

$$y'' = -2y' - y + 10 \quad /7.32/$$

конечный фрагмент программы имеет вид

... В/О 01 00 ИПА – ИПВ 2 х – В/О.

Продолжительность счета одного шага программы 65...70 с. В регистре x получаем значение y_i , а в регистре B – значение y'_i .

Точное решение уравнения /7.26/ с соответствующими постоянными коэффициентами и начальными условиями имеет вид

$$\begin{aligned} y &= 10(1-2t)e^{-t}; \\ y' &= 20(1-t)e^{-t}. \end{aligned} \quad /7.33/$$

В табл.7.5 приведены результаты точного решения уравнения /7.26/, численного решения на микрокалькуляторе и решения на АВМ. Точность численного решения выше, чем на АВМ. При наличии соответствующего программного обеспечения затраты времени также меньше. Это свидетельствует о целесообразности использования для моделирования относительно простых систем.

§ 7. Моделирование на ЭЦВМ

Большие возможности математического моделирования могут быть реализованы на ЭЦВМ. Быстродействие существующих машин серии ЕС – до нескольких миллионов операций в секунду, объем оперативной памяти – до 16324 Кбайт. Это позволяет моделировать сложные системы, включая модели основных металлургических производств.

Решение	0	0,5
---------	---	-----

Точное

$$\begin{aligned} 10(1+2te^{-t}) &= y(t) \quad y(t) & 10,0 & 16,06 \\ 20e^{-t}(1-t) &= y'(t) \quad y'(t) & 20 & 6,07 \end{aligned}$$

Численными методами	$y(t)$	10,0	16,04
на МК	$y'(t)$	20,0	6,09

На АВМ	$y(t)$	9,99	16,10
	$y'(t)$	20,0	6,20

I52

Таблица 7.5

Время, с							
1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	
I7,36 0,00	I6,69 -2,23	I5,4I -2,7I	I4,I0 -2,46	I2,99 -1,99	II,47 -1,10	I0,67 -0,54	
I7,33 0,03	I6,67 -2,21	I5,40 -2,69	I4,09 -2,44	I2,98 -1,98	II,46 -1,09	I0,67 -0,53	
I7,48 0,16	I6,93 -2,00	I5,64 -2,50	I4,59 -2,12	I3,6I -1,8	I2,14 -1,0	II,4I -0,50	

В качестве примера рассмотрим модель конвертерной плавки и использование ее в процессе исследования.

Математическая модель конвертерной плавки основана на уравнениях материального и теплового балансов с учетом термодинамики и кинетики физико-химических процессов и является статической детерминированной. В ней по известным /заданным/ входным параметрам определяются неизвестные выходные – конечные результаты процесса. В качестве последних используют:

содержание марганца x_1 , фосфора x_2 и серы x_3 в готовой стали в процентах. Содержание углерода и температуру металла на выпуске задают в соответствии с маркой выплавляемой стали;

расходы извести x_4 , дутья x_6 и охладителя x_9 – металлолома или окатышей /руды/;

массу конечного шлака x_5 , объем отходящих газов x_7 и выход жидкой стали x_8 .

Все расходы рассчитывают на 100 кг металлолома.

Исходные данные в соответствии с технологией процесса:

~~состав и температура чугуна и металлолома;~~

~~состав и расход неметаллических материалов /плавикового шпата, футеровки, микарного шлака и др./;~~

состав и расход углеродсодержащих добавок /угля и др./; защитной среды /при донной продувке/;

условия проведения плавки, которые включают в себя условия продувки /сверху, донная, степень дожигания CO/, охлаждения /лом, руда, окатыши/, варианты раскисления металла, чистоту кислорода и степень его усвоения ванной, потери металла с выбросом и выносом, тепловые потери агрегата, заданный состав и температуру стали, химический состав раскислителей и др.

Математическое описание плавки представлено девятью уравнениями баланса, в ряде которых учитывают распределение примесей между металлом и шлаком в соответствии с константой равновесия и степенью незавершенности /отклонение от равновесия/ процесса. Матрица коэффициентов системы уравнений приведена в табл.7.6, из которой видно, что система уравнений нелинейна. Решение выполняется на ЭЦВМ методом последовательных приближений до сходимости с заданной точностью.

Математическая модель позволяет исследовать различные варианты технологии конвертерного процесса при верхней и донной подаче кислорода, в частности, возможные способы повышения доли лома в шихте конвертеров, влияние исходного сырья на технико-экономические показатели процесса и др.

Таблица 7.6

Уравнение баланса	Нес известные										
	[Mn], %	[P], %	[S], %	Известь, кг	Шлак*, кг	Кислород*, кг	Газы, м ³	Сталь*, кг	Металлолом, кг	Свободный член	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
Марганца	1	$a_{11}x'_5 + x'_8$	0	0	a_{14}	0	0	0	0	a_{19}	a_{10}
Фосфора	2	0	$a_{22}x'_5 + x'_8$	0	0	0	0	0	0	a_{29}	a_{20}
Серы	3	0	0	$a_{33}x'_5 + x'_8$	a_{34}	0	a_{36}	0	0	a_{39}	a_{30}
Извести	4	0	0	0	a_{44}	0	0	0	0	a_{49}	a_{40}
Количество шлака	5	$a_{51}x'_8$	$a_{52}x'_8$	$a_{53}x'_8$	a_{54}	a_{55}	a_{56}	0	0	a_{59}	a_{50}
Дутья	6	$a_{61}x'_8$	$a_{62}x'_8$	0	a_{64}	a_{65}	a_{66}	a_{67}	a_{68}	a_{69}	a_{60}
Дымовых газов	7	0	0	0	a_{74}	0	a_{75}	a_{77}	a_{78}	a_{79}	a_{70}
Жидкого металла	8	$a_{81}x'_8$	$a_{82}x'_8$	$a_{83}x'_8$	a_{84}	a_{85}	0	a_{87}	a_{88}	a_{89}	a_{80}
Тепловой	9	$a_{91}x'_8$	$a_{92}x'_8$	0	a_{94}	a_{95}	a_{96}	a_{97}	a_{98}	a_{99}	a_{90}

* На 100 кг металлошахты.

Для моделирования предусматривают возможность замены в базовом варианте исходных данных как отдельными числами, так и массивами. При этом последовательно рассчитывается каждый вариант и выдаются результаты. Расчет одного варианта длился примерно 1 мин машинного времени.

Для оптимизации количества вариантов расчета, достижения высокой достоверности результатов и упрощения определения коэффициентов регрессии можно использовать метод планирования эксперимента. В зависимости от количества анализируемых факторов применяют план полного или дробного факторного эксперимента. Возможно включение в математическую модель процесса подпрограммы для обработки результатов моделирования методом регрессионного анализа и представления результатов в виде уравнения регрессии с оценкой его достоверности.

В качестве примера рассмотрим моделирование конвертерной плавки с верхней продувкой. Исследовалось влияние ввода топлива /угля/ в конвертер на долю металломолома в шихте 10, %. Варьировались следующие параметры: расход топлива $m(x_1)$, степень усвоения ванной теплоты от сжигания топлива $\varphi(x_2)$, степень окисления углерода ванны до CO_2 к (x_3), содержание кремния в чугуне $Si(x_4)$, температура чугуна $T(x_5)$ /табл. 7.7/.

Реализованы план полного факторного эксперимента первого порядка, матрица планирования 2^5 . Доля металломолома в шихте представлена в виде линейного полинома

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j. \quad /7.34/$$

В результате расчета коэффициентов регрессии получено уравнение для нормированных уровней факторов

$$y = 27,8 + 0,95 x_1 + 0,38 x_2 + 1,463 x_3 + 0,497 x_4 + 2,89 x_5 + \\ + 0,148 x_1 x_5 + 0,38 x_2 x_5 + 0,045 x_3 x_5 + 0,003 x_4 x_5. \quad /7.35/$$

Чтобы определить дисперсию опыта b_0^2 , в центре плана воспроизвели отклики функции при значениях факторов $x_i \pm \Delta x_i$, где Δx_i взяты в пределах ошибки измерения параметров x_i в реальных условиях. Колебания значений факторов в натуральных величинах $\Delta m = \pm 0,004$; $\Delta \varphi = \pm 0,03$; $\Delta Si = \pm 0,02\%$; $\Delta T = \pm 5 {}^\circ C$; $\Delta m = \pm 0,075$ г.

Рассчитанная дисперсия опыта /см. главы 5, 6/ $b_0^2 = 0,123$; дисперсия коэффициентов регрессии $b_{ij}^2 = 0,00385$; среднеквадратичное отклонение $b_i = 0,062$.

Факторы	Степень доми- гания до CO_2 (x_1)		Доля усвоен- ной ванной теплоты топлива (x_2)	
	норми- рованное значение	нату- ральное значе- ние, доли ед.	норми- рован- ное значе- ние	нату- ральное значе- ние, доли ед.
Основной уровень	0	0,125	0	0,875
Интервал варьи- рования		0,025		0,075
Верхний уровень	+I	0,150	+I	0,950
Нижний уровень	-I	0,100	-I	0,800

Таблица 7.7

Кремний в чугуне (x_3)		Температура чугуна (x_4)		Расход угля (x_5)	
норми- рован- ное значе- ние	нату- ральное значе- ние, %	норми- рован- ное значе- ние	натураль- ное зна- чение, °С	норми- рован- ное значе- ние	нату- ральное значе- ние, т
0	0,9	0	1345	0	1,0
	0,2		15		1,0
+I	I, I	+I	1360	+I	2,0
-I	0,7	-I	1330	-I	0,0

После проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии /7.35/ по t -критерию и отсева незначащих факторов /см. гл. 6/ для натуральных значений факторов получили

$$\theta = 24,92 + 40 /K - 0,125 /I0,796 + 0,148 m/ + \\ + 5,06 /φ - 0,875/ + 7,32 /Si - 0,9/ + \\ + 0,033 /T - 1345/ + 2,89 m. \quad /7.36/$$

Дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2 = 0,0035$; расчетное значение $F_p =$
 $= \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_0^2} = 0,028$ меньше табличного $F_t = 1,88$.

Для проверки полученного уравнения /7.36/ по данным промышленных плавок была рассчитана доля лома в шихте θ_p и сопоставлена с результатами промышленного эксперимента θ_f . Данные расчета нанесены на рис. 7.4, из которого видно, что полученное в результате моделирования уравнение хорошо описывает результаты промышленного эксперимента /коэффициент корреляции $R = 0,99/$.

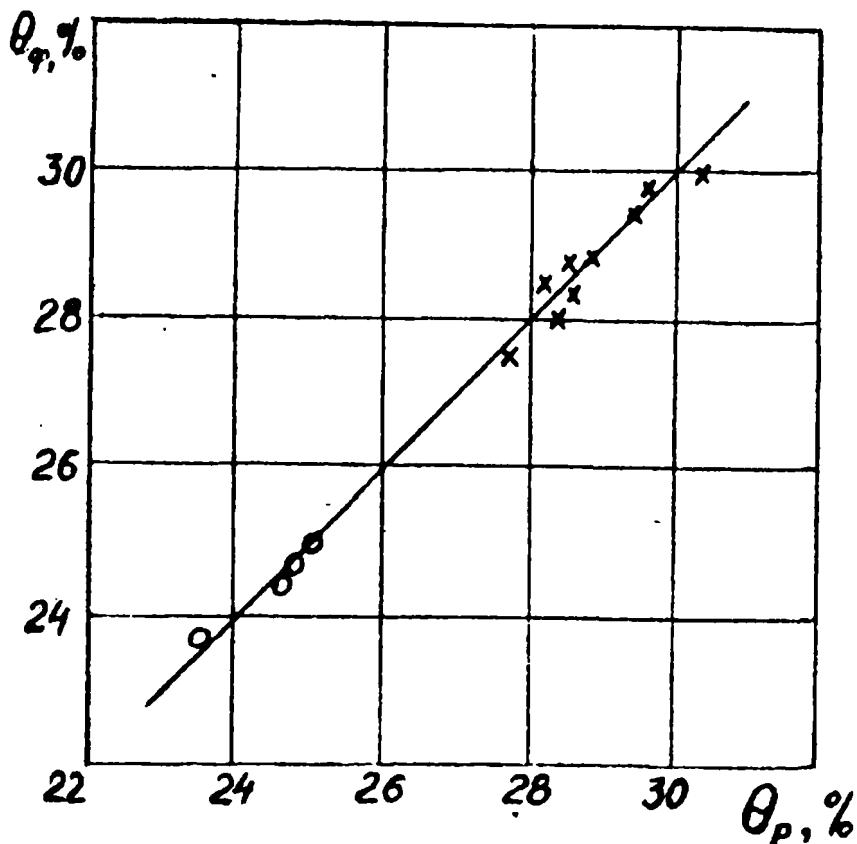


Рис. 7.4. Сравнение расчетных θ_p и фактических θ_f значений доли лома в шихте: o - без ввода топлива в шихту; x - при вводе топлива в шихту

Контрольные вопросы

1. На какие группы делятся модели?
2. Чем определяется выбор способа моделирования?
3. Что такое критерии подобия?
4. В чем заключается основное требование подобия?
5. Перечислите основные критерии подобия. Какие отношения они выражают?
6. Сущность приближенного моделирования. На каких принципах оно основано?
7. Как рассчитывают основные факторы моделирования?
8. Какие методы получения информации используют при моделировании?
9. Как обрабатывают данные моделирования?
10. Какие принципы используют при аналоговом моделировании?
11. Что представляет собой математическая модель?
12. Охарактеризуйте задачи, решаемые методами математического моделирования.
13. Как осуществляется математическое моделирование?
14. Какие задачи математического моделирования решаются на АВМ?
15. Как выбирается масштаб переменных при аналоговом моделировании?
16. Оцените возможности программируемых микрокалькуляторов для математического моделирования.
17. Как разрабатывается математическая модель для ЭЦВМ?
18. Как оценить адекватность модели и объекта?
19. Как обрабатываются и используются результаты математического моделирования?

Глава 8. ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ СЫРЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДОМЕННОГО И ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОЦЕССОВ

§ I. Исследования в области производства окускованного сырья

Подготовка железорудного сырья предполагает получение шихты для доменных печей с высоким содержанием железа, оглюсованной пустой породой и определенного гранулометрического состава повышенной газопроницаемости. Замена сырых пылевидных руд агломератом повысила производительность доменной печи на 25–30%, а расход кокса снизился на 20%, а также позволила удалять из шихты до 95% всей серы. Опыт работы доменных печей на окускованном сырье показывает, что увеличение содержания

железа в шихте на 1% повышает производительность печи на 2,5-3% и снижает удельный расход кокса на 1,4-2%. Поэтому исследование процессов подготовки сырья к металлургическому переделу позволяет вскрывать резервы для значительного улучшения технико-экономических показателей восстановительных агрегатов.

Технология производства окусованного сырья состоит из совокупности сложных механических, химических, физических и физико-химических процессов. Особенности совершенствования подготовки сырья к металлургическому переделу в значительной мере определяются опережающим развитием фундаментальной и смежных отраслей науки и производства. Широкое внедрение современных достижений физики, химии и математики в подготовку сырья способствует совершенствованию ее структуры, дальнейшей специализации и концентрации. Качественные изменения в подготовке сырья к доменному переделу и периоды его интенсивного развития связаны с важнейшими научными открытиями и достижениями в области науки и техники.

Новые радикальные решения и открытия в подготовке сырья нередко приводили к возникновению противоречий между существующими технологическими процессами. Это вызывало отмирание, замену существующих процессов, методов, материалов, либо совершенствование их на новой основе. Так, увеличение производства концентратов глубокого обогащения потребовало изыскания новых форм окусования.

Научные разработки по изучению кристаллизации, структуры и свойств спекаемого агломерата, гидродинамики жидкых расплавов, исследования физико-химических и адсорбционных явлений послужили предпосылкой для создания новых технологических процессов, способствовали ускоренному развитию и повышению научного и технического уровня подготовки сырья к доменной плавке в нашей стране.

Важное направление развития методов подготовки сырья – их механизация и автоматизация. Основой для создания автоматизированных систем становятся целевые научные исследования по определению главных закономерностей и оптимизации параметров технологических процессов. Решение этих задач в значительной мере связано с производством и использованием средств вычислительной техники и всесторонним исследованием объектов автоматизации.

Исследование процесса агломерации. Агломерацией называется процесс окусования мелких материалов спеканием за счет сжигания топлива в самом материале или подвода теплоты со стороны. Производство агломерата складывается из подготовки шихты к спеканию, спекания, охлаждения

и сортировки. Подготовка шихты к спеканию заключается в усреднении материалов, придании им необходимой крупности, дозировании компонентов в соответствии с расчетом шихты, смешиванием и окомкованием. Компоненты шихты дозируются тарельчатыми и ленточными дозаторами, смешивание происходит в барабанах-смесителях, а окомкование - в барабанах-окомкователях. После этого шихту загружают на агломерационную машину, где происходит спекание. Далее готовый агломерат охлаждается в чашевых или в ленточных охладителях. После отсева мелочи, которая идет в возврат, агломерат поступает в доменные цехи.

Основные практические цели исследований в агломерационном производстве направлены на интенсификацию процесса, улучшение качества агломерата и снижение его себестоимости и разделены на следующие направления.

1. Повышение газопроницаемости шихты за счет улучшения ее окомкования, которое достигается путем оптимизации компонентов шихты /возврата, концентрата, железной руды и вяжущих добавок/, поддержанием оптимальной влажности шихты, усовершенствованием конструкции окомкователей и агломерационных машин, подогревом шихты до температуры выше точки росы. Эти мероприятия повышают производительность агломашины. Важной является проблема освоения процесса при более глубоком вакууме, под давлением, что позволит увеличить толщину слоя шихты, а значит, и производительность агломашины.

2. Рациональное использование и экономия топлива достигаются в результате оптимизации гранулометрического состава твердого топлива; двухслойной загрузки шихты с различным количеством топлива в слоях; охлаждения готового агломерата в хвостовой части машины с последующим использованием этой теплоты для предварительного подогрева шихты; эффективного зажигания шихты путем рационализации конструкции зажигательных горнов; заменой коксика антрацитовым штыбом, каменным углем, мазутом, горючими газами.

3. Повышение качества агломерата. Усовершенствование технологии агломерационного процесса, обеспечивающее снижение содержания фракции 0...5 мм в агломерате до 3-4%, в верхнем пределе крупности - до 60 мм. Для этого разрабатывают наиболее рациональные составы цементирующей фазы при кристаллизации спеков готового продукта. Упрочнение достигается также за счет оптимального режима охлаждения спека и его термообработки.

4. Создание автоматизированной системы управления тепловым состоянием.

При изучении агломерационных процессов проводятся теоретические и лабораторные исследования, а также промышленные испытания.

Теоретические исследования агломерационного процесса базируются на расчетах агломерационной шихты, материального и теплового баланса. Основой расчета материального баланса являются количественные соотношения основных материалов, подлежащих спеканию, заданная основность агломерата и оптимальное содержание топлива, возврата и влаги в шихте. Для расчета теплового баланса агломерации составляют балансовые уравнения прихода и расхода теплоты. При исследовании спекания шихты выполняют газодинамические, термодинамические и кинетические расчеты с определенными допущениями. Исследователи работают над созданием математических моделей как процесса агломерации в целом, так и отдельных его составляющих. Математические модели базируются на закономерностях, установленных эмпирическим путем при исследовании локальных процессов на лабораторных установках и в промышленных условиях.

Лабораторные исследования агломерационного процесса проводят в аглоочашах малого размера. Лабораторная установка показана на рис.8.1. На таких установках достигается практически полное подобие натуре, что создает хорошие условия для глубокого исследования явлений, протекающих при спекании. Здесь прежде всего необходимо соблюсти геометрическое и газодинамическое подобие, определяемое числами Лагранжа $La = \Delta Pd/\eta v$, где ΔP - потери давления в слое; d - характерный размер шихты, составляющей слой; η - коэффициент динамической вязкости; v - скорость газового потока/. Смешивание и окомкование моделируют на лабораторных барабанах уменьшенного размера, а параметры конгролируют так же, как и на промышленных машинах.

Прочность агломерата и окатышей определяют стандартным методом. Пробу агломерата крупностью 5...40 мм массой 15 кг загружают в закрытый барабан /рис.8.2/, который вращают со скоростью 25 об/мин в течение 8 мин. Выгруженную из барабана пробу рассевают на ситах 5,0 и 0,5 мм.

Результаты испытаний оценивают показателями сопротивления удару $X = m_1 \cdot 100/m$ и истиранию $X_s = m_2 \cdot 100/m$, где m_1, m_2 - выход класса соответственно +5 мм и меньше 0,5 мм, кг; m - исходная масса навески, кг.

В нашей стране разработан стандартный метод оценки прочности агломерата при восстановлении в установке, схема которой показана на рис.8.3. Навеску агломерата /окатышей/ с исходной крупностью 10...25 мм

массой 500 г загружают в барабан I, который вращается со скоростью 10 об/мин. В барабане постепенно повышается температура от 20 до 850 °С в течение 3,5 ч. Одновременно в печь подают восстановительный газ.

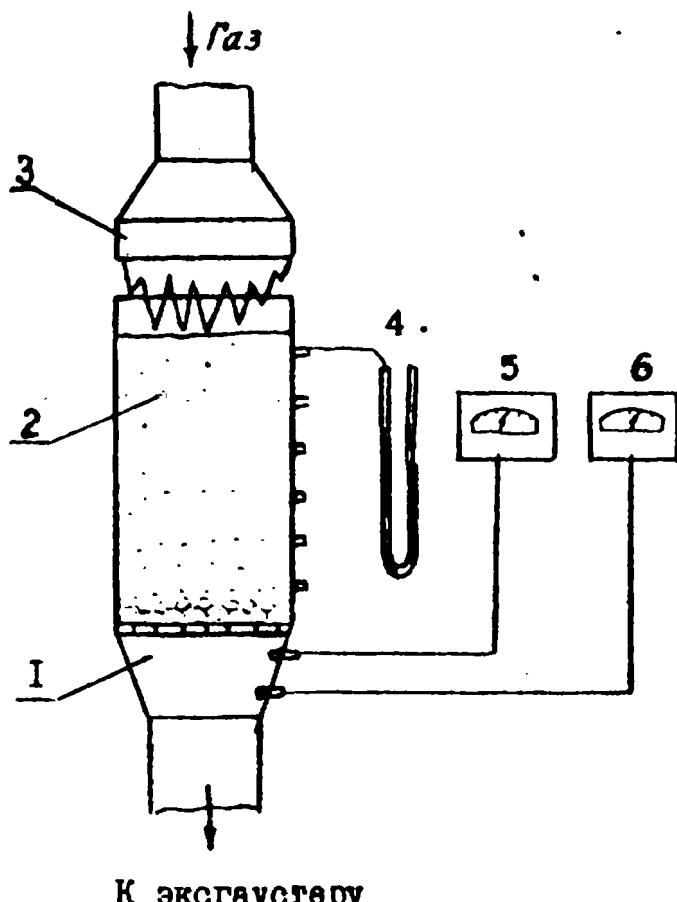


Рис.8.1. Схема лабораторной агломерационной установки: 1 - вакуум-камера; 2 - чаша; 3 - зажигательный горн; 4 - прибор для контроля давления по высоте слоя; 5 - прибор для контроля температуры; 6 - прибор для контроля разрежения в вакуум-камере

После окончания испытания пробу рассеивают на ситах и определяют прочность, разрушаемость и истираемость аналогично предыдущим.

Промышленные испытания проводят непосредственно на агломерационных машинах после опробования новой технологии в лабораторных условиях в целях подтверждения и корректировки результатов лабораторных экспериментов, а также накопления агломерата для последующей опытно-промышленной проверки нового сырья на доменных печах.

Исследования процессов окомкования и обжига железорудных окатышей. Окатыши – относительно новый вид сырья, и объем его производства примерно в 3 раза меньше, чем агломерата. Основные этапы при производст-

засыпкой следующие: подготовка шихтовых материалов; дозирование и смешивание шихты; производство сырых окатышей; сушка, обжиг и охлаждение окатышей.

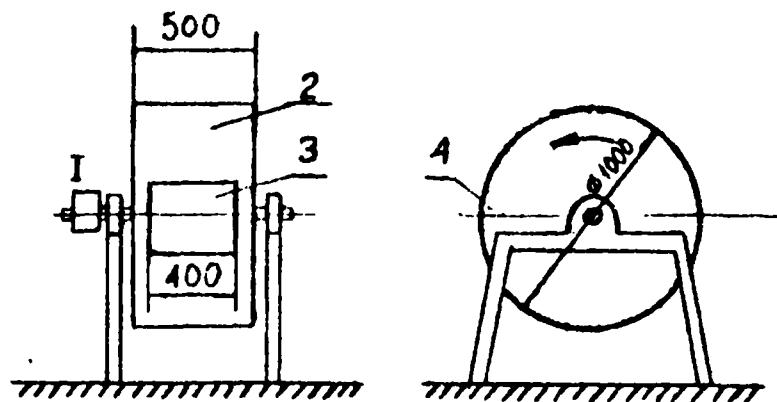


Рис.8.2. Схема лабораторного барабана для испытания агломерата на прочность; 1 - счетчик оборотов; 2 - барабан; 3 - люк; 4 - уголок

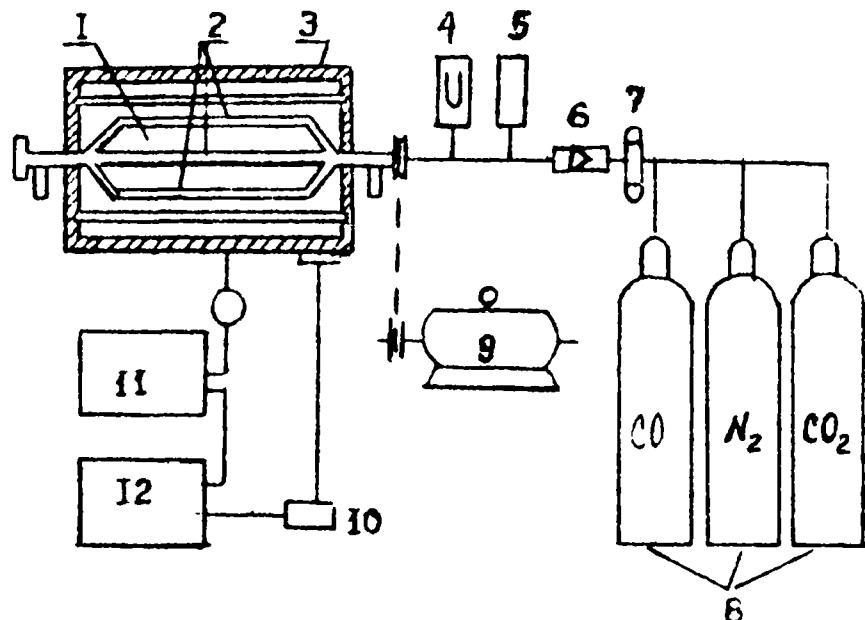


Рис.8.3. Схема установки для определения прочности окускованного сырья при восстановлении: 1 - барабан; 2 - полки; 3 - разъемная нагревательная печь; 4 - манометр; 5 - газоанализатор; 6 - ротаметр; 7 - смеситель; 8 - баллоны; 9 - двигатель; 10 - регулятор напряжения; II - терморегулятор; I2 - потенциометр

При производстве окатышей возникают такие вопросы, требующие исследования.

I. Повышение прочности готовых окатышей обеспечивается изысканием новых поверхностно-активных добавок; оптимизацией условий увлажнения

ния шихты; усовершенствованием режима накатывания, рационализацией обжига окатышей; изучением структуры окатышей для отыскания путей повышения их прочности.

2. Разработка и освоение производства полностью оглюсованных окатышей, а также технологии производства металлизованного железорудного сырья.

3. Создание и внедрение автоматизированных систем управления технологическим процессом /АСУ ТП/.

Для исследований процессов, связанных с усовершенствование производства окатышей, используются многие методики, разработанные для изучения агломерации, однако специфические свойства этого вида сырья вызвали необходимость разработки новых методов, особенно при оценке качества окатышей. Такие методы были разработаны и после опробования стандартизованы. Для непосредственной оценки изменения газопроницаемости окатышей, разрушающихся по ходу их восстановления, применяют стандартную методику, схема которой показана на рис.8.4.

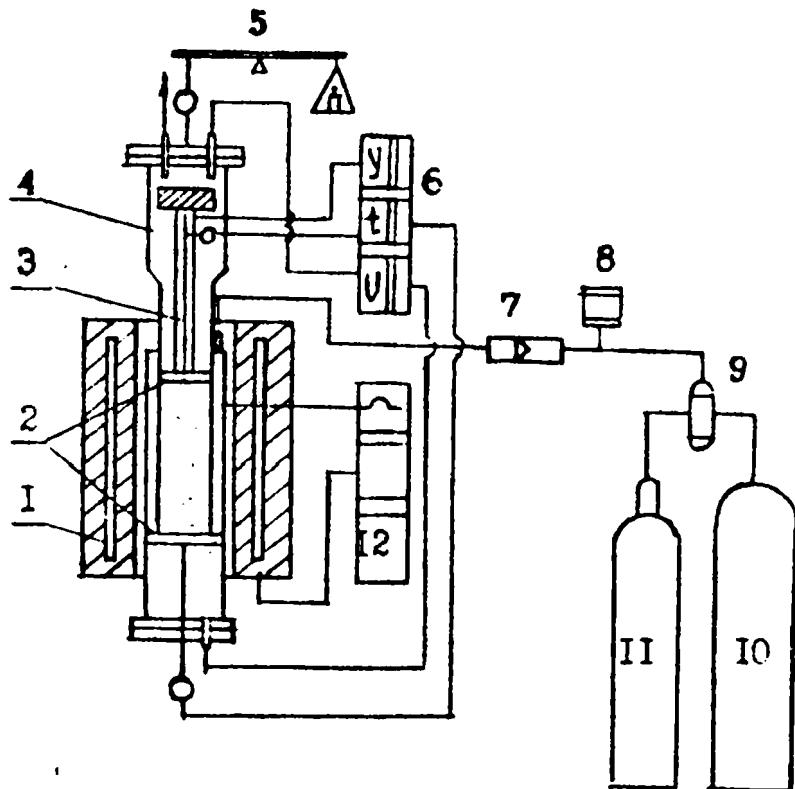


Рис.8.4. Схема установки для оценки изменения газопроницаемости слоя окатышей /агломерата/ по ходу восстановления под нагрузкой:
I - электропечь; 2 - решетка; 3 - шток с грузом; 4 - реакционные трубы; 5 - взвешивающее устройство; 6 - контрольно-измерительные приборы, фиксирующие усадку, температуру и перепад давления; 7 - ротаметр; 8 - газоанализатор; 9 - смеситель; 10 - газогенератор; II - баллон; 12 - терморегуляционная система

Пробу массой 500 г фракции 10...16 мм высушивают при температуре 105...110 °С, укладывают в реакционную трубу и накрывают решеткой 2 с грузом 3, создавая давление на пробу 98,1 кПа. Включают нагрев и подают восстановительный газ. Продолжительность испытания 3 ч. Температуру в печи повышают по определенному графику. Контрольно-измерительные приборы фиксируют во время опыта усадку слоя, температуру и перепад давления газа. По ходу испытания через каждые 30 мин анализируют газ-восстановитель. В конце испытания пробу охлаждают до 200...300 °С в токе восстановительного газа, дальнейшее охлаждение происходит на воздухе. Пробу взвешивают и определяют ее химический состав.

Перепад давлений, измеряемый по ходу испытания, характеризует значение газопроницаемости; усадку слоя определяют по конечной высоте, выраженной в процентах от исходной; степень восстановления рассчитывают по формуле $R = (m_u - m_s) \cdot 10^4 / m_u / 0,429 Fe_{\text{общ}}'' - 0,111 Fe'' /$, где m_u , m_s - масса пробы соответственно исходной и восстановленной, г.

§ 2. Исследования в области доменного производства

Чугун, производящийся в доменных печах, - многокомпонентный сплав на основе железа, который содержит, кроме углерода, кремний, марганец, серу, фосфор и другие элементы и служит основным шихтовым материалом при производстве стали.

Высокоэффективная работа доменных печей достигается при максимально возможной производительности и минимальном расходе топлива. Эффективность доменного процесса повышалась на базе фундаментальных исследований, приводивших к крупным изобретениям и усовершенствованиям технологии и конструкций доменных печей /например, замена древесного угля коксом, подача нагретого дутья в доменную печь, применение в доменной плавке оглюсованного окискованного сырья, повышенное давление, вдувание в печь добавочных восстановителей и др./.

Поскольку доменная плавка состоит из сложного комплекса взаимосвязанных явлений, при ее изучении применяют анализ и синтез. Из всего комплекса доменного процесса часто выделяют некоторые главные явления, рассматривая их вначале изолированно друг от друга /анализ/. Так, выделяются механические и газодинамические процессы, описывающие загрузку и распределение материалов на колошнике, движение материалов и газов; физико-химические - разложение и восстановление шихты, плавление чугуна, шлака и их взаимодействие; горение кокса в горне и т.д. Хотя такое разделение условно, но оно позволяет исследовать сложное производство более простыми методами, чтобы потом рассмотреть его в целом, во взаимосвязи отдельных составляющих /синтез/.

Доменное производство изучается теоретически /на основе теории металлургических процессов, газодинамики, механики/ и экспериментально /путем лабораторных исследований и в процессе непосредственного испытания на работающих доменных печах/.

Исследование загрузки шихты и газодинамики в "сухой зоне" доменной печи. Хорошая газопроницаемость шихты – важное условие достижения высокой производительности печи. Распределение шихты на колошнике влияет не только на степень использования газового потока, что отражается на расходе кокса, но и на общую ее газопроницаемость, кроме известного влияния гранулометрического состава. Поэтому основная задача этих исследований состоит в том, чтобы добиться такой загрузки и распределения шихты на колошнике, при котором использование газового потока было бы максимально возможным при достаточной газопроницаемости, позволяющей вести доменную печь с высокой интенсивностью.

Теоретические исследования загрузки печи конусными и бесконусными загрузочными устройствами, распределения материалов и газодинамики "сухой зоны" доменной печи выполняют на основе создания математических моделей. Газораспределение и потери давления в неравномерно распределенной шихте по радиусу печи рассчитывают по известным закономерностям движения газа в слое сыпучих материалов, описанных Н.М. Жаворонковым, М.А. Стефановичем, А.Н. Раммом и др.

В результате этих исследований на качественном уровне определяются рациональные конструкции загрузочных устройств и их элементы, а также приемы загрузки, которые после дальнейшей проверки на доменных печах позволяют оптимизировать противоток шихты и газа и тем самым повысить эффективность доменной плавки.

Лабораторные исследования проводят на физических моделях /рис.8.5/ для подтверждения теоретических предпосылок и отыскания рациональных режимов загрузки.

Для соблюдения идентичности условий распределения шихты на колошнике модели доменной печи обеспечивают геометрическое подобие, а также идентичность безразмерных критериев расхода шихты $Q_w/d^{2.5}g^{0.5} = idem$ и массы подачи $M/D_K^3 \rho_w = idem$, где Q_w – расход шихты, $\text{м}^3/\text{с}$; d – средний диаметр шихты, м; g – ускорение свободного падения; M – масса подачи, кг; D_K – диаметр колошника, м; ρ_w – насыпная масса шихты, $\text{кг}/\text{м}^3$. Бесконусные загрузочные устройства требуют соблюдения количества витков шихты на каждой станции $\omega M/Q_w \rho_w = idem$, где ω – скорость вращения лотка, $\text{рад}/\text{с}$. Определяющим критерием подобия для радиального распределения шихты служит геометрическое очертание слоя в

вертикальном сечении, которое может быть выражено соотношением толщин слоя или масс материалов по равновеликим площадям поперечного сечения колошника: $\beta_w = (\Pi_n + \Pi_c) / (\Pi_u + \Pi_c) = idem$, где Π_n, Π_c, Π_u - параметры слоя /толщина, масса или объем шихты/. Для окружного распределения определяющим служит коэффициент неравномерности: $\varphi = (\Pi_{max} - \Pi_{min}) / \Pi_{cp} = idem$, где $\Pi_{max}, \Pi_{min}, \Pi_{cp}$ - максимальное, минимальное и среднее значения параметров в секторах по окружности колошника. Количество дугья на модель рассчитывают исходя из числа Эйлера $E_u = \Delta P / v_r^2 \rho_r = idem$, в автомобильной области - по числу Рейнольдса $Re = v_r d / \nu_r$, где ΔP - потери давления газа в слое шихтовых материалов, Па; v_r - скорость газа, м/с; ρ_r - плотность газа, кг/м³; ν_r - коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с. Автомодельную область в зависимости $\beta_w = f(D_h / d)$ используют также для выбора размера моделируемой шихты, поскольку геометрически он не моделируется из-за перехода его в другое качество /порошок/ при значительном уменьшении размеров согласно масштабу.

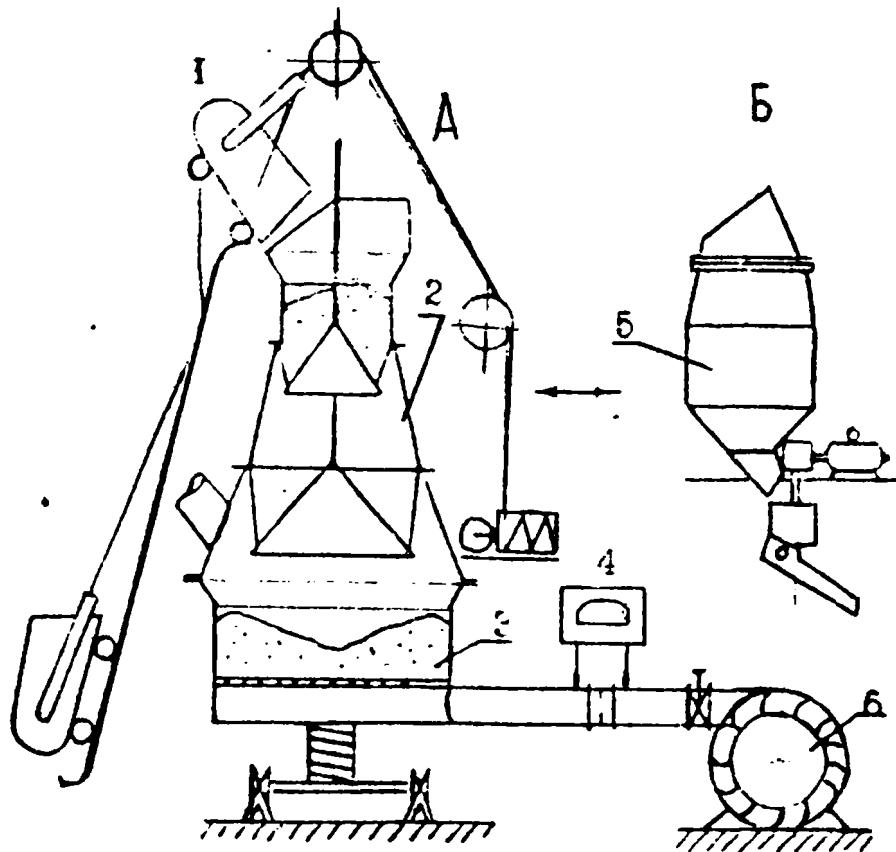


Рис.8.5. Схемы загрузочных устройств конусного А и лоткового Б типов: 1 - склон; 2 - конусное загрузочное устройство; 3 - колошник; 4 - расходомер; 5 - загрузочное устройство с врачающимся лотком; 6 - вентилятор

Конструктивные и технологические параметры моделей загрузочных устройств выбирают исходя из критерия механического подобия /число Ньютона/ $Ne = Fr^2/ML$, где F , r , L - силы, время и перемещение под действием этих сил.

Потери давления измеряют дифференциальным манометром, скорости газа по радиусу - термовакууметрическими точечными датчиками.

Траектории движения газа в послойно загруженной шихте определяют моделированием на электроаналоговой модели ЭГДА, среда которой представляет собой электропроводящую бумагу, вырезанную в соответствии с профилем шахты доменной печи, и сопротивлением, соответствующим сопротивлению послойно загруженной шахты. Через медные шины на нее подается ток напряжением до 36 В, и специальным шупом, соединенным с вольтметром, снимаются точечные показания напряжения, которые отвечают линиям тока моделируемого газа, поскольку движение газа в доменной печи и движение тока по электропроводящей бумаге подобны и описываются одинаковыми уравнениями:

$$V_r = B dP/dF; \quad i = R du/dF,$$

где B - коэффициент сопротивления шахты /соответствует сопротивлению электропроводящей бумаги R на модели/; dP - потери давления в слое печи /соответствуют напряжению тока du на модели/.

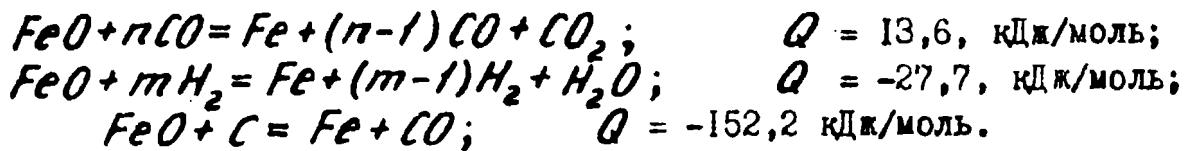
Эти исследования позволяют наглядно представить движение газа в доменной печи при тех или иных условиях загрузки и обнаружить определяющие зоны /узкие места/ по перепаду давления. Движение шихты моделируется аналогично движению газа.

Промышленные исследования проводят непосредственно на доменных печах для проверки эффективности выбранных технологических нововведений. При этом контролируют температуру, содержание диоксида углерода по радиусу и окружности колошника. Температуру измеряют как с помощью стационарных термопар, вделанных в кладку, так и с помощью передвижных специальных горизонтальных и вертикальных зондов. Состав газа контролируют оптико-акустическими газоанализаторами, хромотографами и масс-спектрометрами. Кроме температуры и состава газа, измеряют давление по зонам, фиксируют производительность, расход кокса и другие технико-экономические показатели доменной плавки. Исследования проводят, как правило, методом сравнительных плавок, сущность которых заключается в чередовании опытных и сравнительных периодов работы доменных печей продолжительностью не менее 3 сут, чтобы избежать влияния нестационарности при переходе из одного технологическо-

го режима в другой. Полученные результаты опытных плавок пересчитывают на одинаковые условия по известным эмпирическим коэффициентам и сравнивают с плавками при обычной технологии. Разница в производительности и расходе кокса дает основание для выводов об эффективности того или иного мероприятия.

Исследование восстановительных процессов в доменной плавке.

В доменной печи восстановительные процессы – основа доменной плавки. Особенность восстановления оксидов железа в доменной печи состоит в сочетании двух процессов, значительно отличающихся друг от друга по затратам теплоты и расходу восстановителей. В верхней части печи при температурах не выше 950...1000 °С протекают процессы косвенного /не-прямого/ восстановления, а в нижней при высоких температурах – прямого восстановления:



Цель исследований восстановительных процессов – определить технологическую возможность организации их хода таким образом, чтобы железо и соответствующие примеси чугуна восстанавливались в необходимом количестве из оксидов с минимальной затратой теплоты и восстановителей.

Теоретические исследования восстановительных процессов проводят на основе термодинамического анализа в том случае, когда реакции близки к равновесию. Значительно сложнее расчеты кинетики процессов восстановления, происходящих в доменной печи. Однако они позволяют определять выходные параметры стационарного режима плавки, поля температур, концентраций, скоростей, давлений газа и пр. Поэтому создание математических моделей процесса, основанных на закономерностях кинетики химических реакций в противотоке, – актуальная задача. Современные математические модели состоят из системы дифференциальных уравнений, описывающих важнейшие процессы и процедуры их интегрирования по времени и пространству доменной печи. Из-за сложности и взаимосвязанности процессов система дифференциальных уравнений решается только численными итерационными методами на современных быстродействующих ЭВМ.

При создании математических моделей возникает целый ряд трудных задач, которые могут быть решены только экспериментальным путем на основе лабораторных исследований. Например, влияние различных факторов на скорость восстановления оксидов железа, находящихся в твердом со-

стоянии, может быть математически описано только для тех факторов, для которых оно не связано с пористой структурой восстанавливаемых материалов.

Лабораторные исследования восстановимости руд и агломератов дают возможность выявить особенности различных стадий восстановления, а также оценить влияние качества железорудных материалов, их минералогического состава, скорости, температуры, давления и состава газового потока на скорость восстановления оксидов в условиях, близких к доменной плавке. Схема лабораторной установки аналогична показанной на рис.8.4.

Чтобы обеспечить идентичные условия для лабораторной установки и натуры, следует соблюдать соответствующий газодинамический режим /числа Эйлера, Рейнольдса/, а также необходимые температуру и состав газа.

При контроле температур обычно пользуются хромель-алюмелевыми и платинородий-платиновыми термопарами. Расход газа измеряют расходометрами переменного перепада, а состав газа – хроматографами.

Цель исследований – получить объективные данные для разработки технологии доменной плавки в специфических сырьевых условиях, а также эмпирические закономерности для использования в математических моделях.

Промышленные исследования. Развитие процессов прямого и косвенного восстановления в конкретных условиях доменной плавки может быть оценено по составу колошникового газа. Для технологического контроля или для более глубокого изучения восстановительных процессов в изменяющихся шихтовых или дутьевых условиях из доменной печи отбирают пробы газа, шихтовых материалов на разных горизонтах, в разных точках по радиусу одновременно измеряют температуру. С этой целью применяется специальный зонд, показанный на рис.8.6.

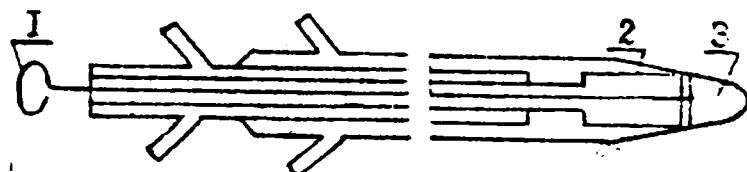


Рис.8.6. Зонд для отбора проб из доменной печи: 1 - шток с петлей; 2 - камера; 3 - пробка

Данные, полученные с применением описанной методики, позволяют сделать заключение о ходе восстановительных процессов в любой точке объема печи, уровне температуры, степени использования восстановитель-

ной способности газов и дать общую оценку эффективности работы доменной печи. Кроме того, они необходимы для определения адекватности создаваемых математических моделей процессам восстановления.

Исследование процессов шлакообразования в доменной печи имеет большое значение для совершенствования технологии плавки и качества чугуна. От свойств первичных и промежуточных шлаков зависит тепловое состояние горна. Шлаки регулируют газопроницаемость в "зонах когезии", сужая или расширяя возможности форсирования плавки, определяют качество чугуна и уровень содержания серы благодаря своим физическим свойствам: вязкости, плавкости, температуре плавления, сорбционной способности и др.

Доменный шлак состоит в основном из балластных, т.е. не содержащих железа, оксидов, вносимых в печь шихтой. Главными составляющими шлака являются оксиды SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO . В шлаке содержится также небольшое количество FeO , MnO и сульфидов металлов. Процесс шлакообразования начинается со спекания рудной части шихты при температуре 1100...1200 °C. Различают три вида шлака: первичный, промежуточный и конечный. Первичный шлак формирует "зоны когезии", шлак переменного состава при движении его до горна называют промежуточным, а ниже уровня фурм - конечным. Состав конечного шлака определяет, в основном, качество чугуна.

Теоретические исследования процессов шлакообразования направлены на создание и интерпретацию математических моделей "состав - свойство", поскольку все перечисленные свойства шлаков зависят от их химического состава. Известны диаграммы и модели свойств доменных шлаков в зависимости от трех основных компонентов / SiO_2 , CaO и Al_2O_3 /, от четырех, пяти и более. Эти модели позволяют заранее определять свойства шлаков при изменении в составе шихты и принимать соответствующие меры. Все имеющиеся диаграммы состояния многокомпонентных систем и математические модели получены, в основном, в процессе лабораторных исследований.

Лабораторные исследования. Для измерения вязкости используют вискозиметры различного принципа действия. Их можно разделить на две группы: стационарные и нестационарные. К стационарным относятся вискозиметры капиллярного истечения, падающего шарика, вращающихся цилиндров и вибрационные, к нестационарным - вискозиметры, основанные на измерении кругильных колебаний системы, сопряженной с используемой жидкостью. Чаще всего применяют электровибрационные вискозиметры /рис.8.7/. Вязкость шлака измеряют при температуре до 1600 °C. Для этого в тигель со шлаком погружают шпиндель и

включают ток на катушку электромагнита. Шпиндель начинает вибрировать, в результате чего возникает трение между слоями шлака, которое нарушает резонанс.

О вязкости судят по масштабу затухания амплитуды колебания. Перед определением вязкости вискозиметр градируют по эталонным жидкостям.

Плавкость шлака /затраты теплоты на расплавление I кг твердого шлака/ определяют на специальных колориметрических установках.

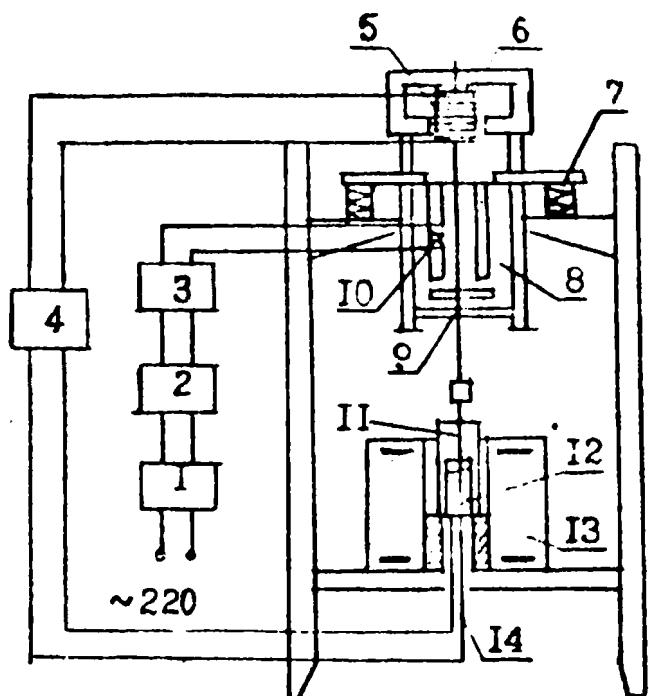
Температуру плавления находят различными методами, чаще всего расплавляя шлаки в лабораторных микропечах, причем начало плавления определяется визуально, а температуру измеряют термопарами либо пирометрами.

"Зоны когезии" исследуют как на "теплых моделях", где температура дугья составляет 150...300 °С, а железо-

Рис.8.7. Схема электровибрационного вискозиметра: 1 - автогрансформатор; 2 - блок питания; 3 - звуковой генератор; 4 - двухкоординатный потенциометр; 5 - катушка с обмоткой; 6 - постоянный магнит; 7 - пружинное устройство; 8 - магнитопровод; 9 - якорь вибратора; 10 - электромагнит; 11 - шпиндель; 12 - гигель; 13 - печь; 14 - термопара

рудные материалы имитируются парафином или сплавом Вуда, так и на "горячих моделях" при температуре 1100...1300 °С с натуральными материалами. Причем на "теплых моделях" исследуется, в основном, влияние различных факторов на форму и общую газопроницаемость "зоны когезии", а на "горячих" - состав исходной шихты на толщину и локальную газопроницаемость.

Промышленные исследования хода шлакообразования проводят, изменяя исходный состав шихты в необходимом направлении за счет ввода различных добавок с последующим анализом работы доменной печи. В этом случае обращают внимание на газопроницаемость нижней зоны, вязкость конечного шлака, содержание серы и кремния в чугуне. При необходимости берутся пробы шлака на выпуске из фурмы печи на остановке и иногда из нижней зоны с помощью специального зонда.



При исследованиях хода шлакообразования в доменных печах изучают: состав и свойства первичных шлаков с различными добавками и их влияние на газодинамику нижней зоны доменной печи; влияние фторсодержащих добавок на шлаковый режим для получения особо чистых по сере передельных чугунов; влияние щелочей на ход шлакообразования в доменной плавке; фактические и равновесные коэффициенты распределения серы при работе на шлаках разной основности; оптимизацию шлакового режима в современных шихтовых условиях; взаимосвязь свойств шлаков с тепловым состоянием горна доменной печи.

Анализ фактических материалов позволяет разрабатывать экономичные технологические методы работы доменной печи для получения чугуна высокого качества.

Исследование процессов в горне доменной печи. К процессам в горне относятся горение углерода и формирование состава газа-восстановителя. Сгорание углерода кокса – основная причина опускания материалов в печи, поэтому размеры, форма и расположение зон горения в горне доменной печи существенно влияют на характер движения шихтовых материалов, распределение газового потока по сечению печи и протекание физико-химических процессов, а следовательно, и на технико-экономические показатели доменной плавки.

Процессы горения изучают по следующим наиболее важным вопросам.

1. Исследование факторов, определяющих объемные параметры зон горения и их влияние на движение шихты и газа в доменной печи.

2. Определение оптимального расхода дополнительного кислорода, вводимого в дутье, при разном количестве добавок природного и коксового газа, мазуга, пылеугольного топлива.

3. Изыскание условий, обеспечивающих максимальный коэффициент замены кокса различными топливными добавками.

4. Исследование процессов вторичного окисления элементов чугуна в очагах горения перед формами при различных дутьевых параметрах.

5. Установление взаимосвязи между теоретической температурой горения топлива на уровне фуры и тепловым состоянием горна.

Разработка этих вопросов позволяет обнаружить новые закономерности и реализовать мероприятия по улучшению технико-экономических показателей доменной плавки.

Теоретические исследования базируются на расчетах объема зон горения исходя из кинетической и полной энергий газового потока; теоретической температуры горения топлива; количества форм; скорости движения шихты; скорости горения углерода и ее влияния

на образование эллипсоидов разрыхления движущейся шихты. Теоретические расчеты подтверждаются лабораторными и промышленными исследованиями.

Для лабораторных исследований используют холодные модели сектора футерменной зоны доменной печи. В этом случае обязательно соблюдение геометрического и газодинамического подобия, определяемого числами Архимеда, Эйлера, Лагранжа, а также симплексом плотностей газа и шихты. Изменение размеров зон циркуляции в зависимости от дутьевого режима контролируют и измеряют визуально.

Промышленные исследования зон горения проводят специальными зондами, аналогичными показанным на рис.8.7, с помощью которых можно измерять температуру, давление и состав газов в любой точке горна. Достоверность таких исследований высока, однако во избежание ошибок в ДМетИ было предложено зондировать зоны горения в различных плоскостях, что позволило расширить существующие представления о процессах, происходящих в окислительных зонах и на участках, примыкающих к ним. Это дало возможность усовершенствовать технологию вдувания дополнительных видов топлива в горн доменной печи.

Исследование доменного процесса не ограничивается перечисленными проблемами и методами. Немаловажную роль в совершенствовании производства чугуна играют, например, теплообмен в доменной печи; автоматизация хода и теплового состояния доменного процесса; вдувание в шахту конвертированных восстановительных газов; возможность применения электроэнергии и низкотемпературной плазмы в доменной плавке; повышенное давление; вдувание в горн колошниковых газов, отмытых от диоксида углерода; оптимизация доменного процесса; применение атомной энергии для восстановления железных руд и др.

Разработка всех этих вопросов позволит получить значительный экономический эффект в доменном производстве.

Исследования в области повышения качества чугуна. Качество чугуна влияет на качество стали, проката и отливок, поэтому исследования в этом направлении актуальны.

Для потребителей доменного чугуна необходимо, чтобы количество вредных компонентов /особенно серы/ было минимальным, а однородность по химическому составу – максимальной. Первая задача решается посредством десульфурации чугуна в печи и вне ее, а вторая – совершенствованием технологии доменной плавки.

В области повышения качества чугуна необходима разработка следующих тем.

1. Выявление и устранение причин неоднородности состава чугуна на выпуске.

2. Разработка рационального шлакового режима доменной плавки, обеспечивающего минимальное содержание серы в чугуне.

3. Исследование влияния технологии доменной плавки на качество чугуна.

4. Исследование и оптимизация внепечных методов обработки чугуна для улучшения его качества.

§ 3. Исследования в области прямого получения железа и стали

В связи с возрастающим дефицитом углей, пригодных для получения кокса в доменных печах, внедоменное получение железа и его сплавов с каждым годом становится все более актуальным. Кроме того, экономические расчеты показывают, что сооружение металлургических заводов с внедоменным производством металла может быть более экономично, чем строительство металлургических заводов по традиционной схеме. Существенно снижаются и эксплуатационные расходы.

Стали и сплавы на основе железа могут производиться как получением губчатого железа и металлизации окатышей или агломерата в восстановительных агрегатах с последующей переплавкой в сталеплавильных агрегатах, так и непосредственным получением жидкого железа с различным содержанием углерода.

Для получения металла прямым путем необходимо увеличить масштабы производства, производительность агрегатов и снизить тепловые затраты на процесс.

Исследования в рассматриваемом направлении ведутся в основном на различных лабораторных и полупромышленных установках, созданных на основе того или иного метода реализации восстановления железорудных материалов.

§ 4. Исследования в области ферросплавного производства

Современная металлургия невозможна без применения ферросплавов – сплавов железа с различными элементами /кремнием, марганцем, хромом и др./, присаживаемых в жидкий металл для его раскисления или легирования. В качестве ведущего элемента в состав ферросплавов входят более 20 элементов периодической системы Менделеева. Сортамент ферросплавов содержит свыше 100 различных марок разнообразных сплавов.

Ферросплавы производятся восстановлением оксидов ведущих элементов из руд и концентратов электротермическим и металлогермическим способами. При электротермическом способе ферросплавы выплавляют в дуговых рудово-составительных и рафинировочных электропечах. В рудово-восстановительных печах ферросплавы получают с использованием в качестве восстановителя углерода в виде кокса, газового угля, полукукаса /углеродотермический процесс/. Углеродотермическим способом производят такие ферросплавы массового применения, как ферросилиций, углеродистые марки ферромарганца и феррохрома, силикомарганец и ферросиликохром. При производстве ферросплавов в рафинировочных печах в качестве восстановителя используют кремний в виде передельных силикосплавов /ферросилиций, силикомарганец, ферросиликохром/. Такой процесс, называемый силикотермическим, обеспечивает получение низкоуглеродистых марок феррохрома и ферромарганца, а также металлического марганца. Металлогермическим способом ферросплавы получают в плавильных горнах или в дуговых сталеплавильных печах измененной конструкции в основном за счет теплого экзотермических реакций восстановления оксидов алюминием /алюминотермический процесс/. Это ферросплавы из трудновосстановимых руд, например, феррогитан, феррониобий и др.

Большое разнообразие технологических процессов выплавки ферросплавов обуславливает многочисленность направлений, приемов и методов исследований, направленных на повышение эффективности производства и улучшение качества ферросплавов. Основные из них следующие.

1. Разработка новых технологических решений по подготовке ферросплавных шихт к плавке. Необходим выбор рациональных технологических схем и оборудования для скускования шихт. Перспективна тепловая обработка шихт вне печи с предварительным частичным их восстановлением.

2. Создание безотходных технологических процессов, обеспечивающих комплексное использование сырья. Необходимо разработать способ утилизации колошникового газа, использования отвальных шлаков, пыли и шламов газоочистки, мелких фракций ферросплавов.

3. Расширение сырьевой базы ферросплавного производства /вовлечение в производство низкосортных кварцитов, карбонатных марганцевых руд, магнезиальных хромовых руд, новых видов углеродистых восстановителей и рыхлителей шихты/.

4. Повышение извлечения ведущих элементов из перерабатываемого сырья за счет совершенствования существующих и создания принципиально новых процессов. Особенно это актуально в металлургии марганца, где сквозное использование последнего от добычи руды до готовой стали составляет около 30%.

5. Разработка оптимальных способов разливки ферросплавов и создание новых видов разливочного оборудования, обеспечивающих минимальные потери готового сплава, улучшение его качества и товарного вида, сокращение затрат на разливку и разделку сплава.

6. Освоение выплавки марганцевых, кремнистых и хромистых ферросплавов в электропечах большой единичной мощности, в том числе герметичных. Мощность современных отечественных ферросплавных электропечей достигает 81 МВ·А. В перспективе она должна быть повышена до 100...120 МВ·А, что улучшит все технико-экономические показатели производства ферросплавов.

7. Разработка оптимальных составов и технологии производства сплавов со щелочноземельными и другими активными элементами для раскисления и модификации стали и чугуна.

8. Разработка новых способов получения высокочистых металлов и ферросплавов для легирования жаропрочных и специальных сплавов.

9. Повышение качества выпускаемых ферросплавов, в частности, снижение содержания в них нежелательных примесей /фосфора, серы, цветных металлов/ и газов.

10. Разработка рациональной технологии фракционирования ферросплавов, обеспечивающей минимальные потери готового сплава в виде некондиционной мелочи, и сокращение затрат на сортировку сплавов.

II. Создание и освоение нового плавильного оборудования для выплавки ферросплавов. Весьма перспективны дуговые печи на постоянном токе, на пониженной частоте, с повышенной плотностью тока на подине, плазменные печи.

Для изучения ферросплавного производства проводятся теоретические, лабораторные и промышленные исследования.

Теоретические исследования в области ферросплавного производства в основном направлены на определение с помощью термодинамики температуры, давления и состава исходных веществ, необходимых для получения сплава заданного состава.

В лабораторных исследованиях изучаются механизм и кинетика восстановления оксидов исходных руд и концентратов различными восстановителями, условия равновесия в системе металл - шлак - газовая фаза при производстве разнообразных ферросплавов, активности компонентов металла и шлака, физико-химические свойства исходных веществ и расплавов ферросплавного производства.

Методы исследования кинетики ферросплавных процессов зависят от типа процесса. Для углеродотермического процесса кинетика восстановле-

ния оксидов углеродом изучается следующими экспериментальными методами: весовым /термогравиметрическим/, газообъемным хроматографическим, вакуумным и др.

Весовой метод основан на измерении уменьшения массы восстановляемого образца с помощью гензометрических датчиков, позволяющих записать кинетическую кривую процесса.

Газообъемный метод дает менее точные результаты, чем весовой, но он проще. При этом методе скорость восстановления определяется по изменению объема газов – продуктов реакции.

Хроматографический метод заключается в контроле состава газов, выделяющихся в результате восстановления, и применяется в тех случаях, когда обычные методы газового анализа непригодны из-за малого количества газа.

При вакуумном методе скорость и степень восстановления оксидов углеродом в вакууме определяются по изменению давления газа, измеряемого высокочувствительным манометром. Для силико- и алюминотермического процессов исследуют скорость достижения равновесия металл – шлак. При этом нужно исключить влияние на изменение состава шлака за счет взаимодействия с огнеупорным тиглем. Это достигается применением метода вращающегося тигля, при котором шлак находится в воронке, не контактируя со стенками тигля, или метода постепенного насыщения. В последнем случае шлак, подаваемый малыми порциями на поверхность металла, впитывается в стенку тигля и не меняет своего состава в ходе опыта. О достижении состояния равновесия при данной температуре свидетельствует постоянство коэффициента распределения ведущего элемента ферросплава между металлом и шлаком.

Механизм процессов восстановления исследуют химическим, рентгеноструктурным и локальным микрорентгеноспектральным анализом продуктов восстановления шихты.

Исследование микроструктуры полученных сплавов с применением микрорентгеноспектрального анализа позволяет определить химический состав выявленных при травлении структурных составляющих. Этим методом устанавливают состав оксидов, карбидов, силицидов, неметаллических включений в рудах, концентратах, сплавах и шлаках ферросплавного производства.

Активности компонентов металла и шлака могут быть рассчитаны на основе парциальных и интегральных теплот растворения или определены экспериментально с использованием электрохимического метода, измерения упругости пара компонентов в растворе и др.

При промышленных исследованиях ферросплавных процессов проводят плавки в промышленных электропечах по опытной технологии, балансовые плавки, контролируют ход процесса, хронометрируя, измеряя температуру и электрические параметры, отбирая пробы металла и шлака ложкой из струи во время выпуска или после их застывания на складе готовой продукции.

Работа ферросплавных печей исследуется для оптимизации электрического режима. Измеряются электрические характеристики отдельных участков системы токоподвода, а также распределение плотности тока, потенциалов в столбе шихты, которое изучают методом зондирования с помощью металлических решеток и шупов. При работе закрытых и герметичных печей исследуют также состав, температуру, количество выделяющихся газов, химический и гранулометрический составы пыли в отходящих газах в зависимости от вида и состава используемой шихты, подводимой мощности, выплавляемого сплава.

Контрольные вопросы

1. Цель окускования железорудного сырья для металлургического передела.
2. Какие виды подготовки сырья к доменной плавке вам известны?
3. Основные цели исследования процессов агломерации.
4. Какие вопросы решаются с помощью теоретических исследований?
5. На каких лабораторных установках проводят исследования в области подготовки сырья к доменной плавке?
6. Какие исследования необходимы в области процессов окомкования и обжига железорудных окатышей?
7. Какая методика разработана специально для исследования качества окатышей?
8. Основные цели исследований в области доменного производства.
9. Назовите основные процессы, протекающие в доменной печи, требующие глубоких исследований.
10. В чем заключаются теоретические исследования доменного процесса?
11. Особенность лабораторных исследований доменного процесса.
12. Какие критерии необходимо выдерживать при моделировании загрузки и газодинамики доменной печи?
13. Методика промышленных исследований, применяемых для проверки новых технологических решений.
14. Каким образом на доменной печи исследуются процессы восстановления?

15. Определите роль исследования процессов шлакообразования в развитии и совершенствовании доменного производства.
16. Методика исследования зон горения на доменной печи.
17. Какие перспективные темы исследований доменного процесса вы знаете?
18. Суть необходимости выплавки железа и стали из руд прямым путем.
19. Укажите роль ферросплавов в сталеплавильном производстве.
20. Какие способы получения ферросплавов вы знаете?
21. Оформулируйте основные цели исследований в области производства ферросплавов.
22. Какими методами исследуется кинетика углеродотермического процесса получения ферросплавов?
23. Какие методы используют при изучении кинетики металлогермических процессов производства ферросплавов?

Глава 9. ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

§ I. Исследование кислородно-конвертерных процессов

Кислородное конвертирование – главный и наиболее экономичный массовый способ производства стали. В мире около 70% стали выплавляется в кислородных конвертерах. Продувка ванн кислородом широко применяется также в марганцовских, двухванных, электродуговых печах. Указанные способы развиваются по пути сближения с кислородно-конвертерным процессом, обладающим еще большими резервами совершенствования и повышения технико-экономических показателей. Основные практические цели исследований кислородно-конвертерного процесса направлены на повышение эффективности производства и улучшение качества стали. Они могут быть разделены на следующие группы.

I. Разработка и совершенствование новых эффективных методов продувки металла кислородом. Это позволит обеспечить комплексное улучшение основных технико-экономических показателей. К таким радикальным методам относятся: продувка донная, комбинированная донно-верхняя; непрерывный сталеплавильный процесс конвертерного типа; способы конвертирования, обеспечивающие повышение доли лома в металлошихте до 40-50% без заметного снижения производительности агрегатов /замена марганцовского скрап-рудного процесса/ и до 80-100% /замена скрап-марганцовского передела и плавки стали в дуговых электропечах/. Наряду с решением комплексных задач зачастую проводятся исследования, направленные на решение важных частных вопросов.

2. Повышение производительности конвертеров. Эта проблема по-прежнему актуальна. Средняя длительность цикла плавки составляет 43...
...44 мин, в то время как в отдельных цехах она снижена до 25...30 мин. Основные пути повышения производительности: совершенствование дутьевого режима путем повышения интенсивности продувки как в течение всего периода /сопряжено с необходимостью реконструкции газоотводящего тракта или создания резервов его пропускной способности при проектировании/, так и в начальном и конечном периодах, когда газовыделение из конвертера понижено /ступенчатая продувка/; улучшение конструкции фурм /увеличение числа сопел, угла расхождения струй/; ускорение завалки лома /ввод его одной порцией большими коробами/, заливки чугуна и сокращение длительности вспомогательных операций /отбор проб, ожидание результатов анализа, слия стали и др./. Наиболее радикальным является применение непрерывного сталеплавильного процесса /НСП/.

3. Снижение расхода чугуна и увеличение доли лома в металлошлаке. Важность этих задач объясняется ростом дефицитности и стоимости кокса и чугуна. Достигается путем повышения температуры чугуна, разогрева лома вне конвертера перед завалкой /в специальных утепленных коробах/ или чаще – в конвертере с помощью мощных фурм-горелок и сжигания угля, частичного дожигания CO в CO_2 в полости конвертера /применением двухъярусной или специальных двухконтурных фурм/, ввода нейтрального газа /Ar, N_2 / через днище для осаждения ванны и твердого теплоносителя /уголь, карбиды Si, Ca/ в ванну. Наиболее радикальное решение – применение донно-верхней продувки и совмещение разных способов увеличения доли лома в шлаке /разогрев лома, дожигание CO , ввод твердого теплоносителя/. В этом случае возможно повышение доли лома до 50 и даже до 100%.

4. Повышение выхода годного металла. Обеспечивается в результате снижения расхода чугуна в металлошлаке и минимизации механических потерь металла при продувке с выбросами и выносом, а также с дымом и в виде корольков со сливаемым шлаком. Минимальные потери с выбросами и выносом достигаются при хорошем шлакообразовании, оптимальном уровне вспененного шлака, который следует контролировать с помощью динамических методов /акустического, вибрационного/. Дымовыделение резко снижается при донной или донно-верхней продувке.

5. Повышение стойкости футеровки конвертеров. Достигается в результате улучшения качества огнеупоров, применения высокореакционной доломитизированной извести /что требует освоения и разработки специальных режимов обжига известняка/; использования рациональной конструкции

фурм, продувки с переменным положением фурмы; применения новых, менее дефицитных, чем плавиковый шпат, и эффективных флюсов /ферритов кальция, отходов силуминового производства/; внедрения динамических систем управления плавкой, ввода инертного газа через дно конвертера /улучшает перемешивание и шлакообразование/; других мероприятий. Наилучшие результаты по повышению стойкости футеровки обеспечиваются при факельном ее горячегоровании.

6. Автоматизация контроля хода плавки и ее управления. Для этого необходимо создавать надежные статические и динамические системы управления. Последние дают возможность непрерывно /или дискретно/ контролировать состав металла /в первую очередь, по углероду/, температуру и уровень ванны специальными датчиками, находящимися в стадии разработки и освоения. Хорошие результаты получены с помощью специальных зондов для периодического отбора проб металла и измерения его температуры. Для успешного создания эффективных динамических систем необходимо объединить усилия автоматчиков, физиков и сталеплавильщиков; знать физико-химические закономерности конвертерной плавки.

7. Передел в сталь специальных видов чугуна. Включает в себя переработку высокофосфористого, ванадиевого, высоко- и низкомарганцевистого чугунов. Каждый из этих процессов отличается своей спецификой и технологией.

8. Повышение качества стали. Достигается прежде всего в результате снижения содержания в ней вредных примесей: серы, фосфора, азота, кислорода, водорода, некоторых цветных металлов /Cu, Pb, Sn и др./, неметаллических включений, особенно остроугольных. Качество стали в значительной степени зависит от технологии продувки, особенно от хода шлакообразования, влияющего на содержание P, S, чистоты кислорода /содержание N/, количества и состава лома /главный источник примесей цветных металлов/, а также режима раскисления и модифицирования /качество и форма включений/ стали. Неправильная технология плавки может быть причиной ухудшения свойств стали, а также появления ряда дефектов слитка /заготовки/. Главное современное направление улучшения качества конвертерной стали заключается в широком применении внепечной обработки чугуна /обессеривание/ и стали в ковше /обработка специальными жидкими шлаками и твердыми смесями, вакуумом, аргоном, модификаторами и др./. Это позволяет комплексно улучшать качество металла и повышать производительность агрегатов.

9. Расширение сортамента сталей, выплавляемых в конвертерах. Достигается увеличением доли производства высококачественных, легированных

ных и высоколегированных /нержавеющих/ сталей. При этом используются специальные приемы технологии и конструкции конвертеров /с донным, боковым дутьем/.

Эффективное решение перечисленных практических задач усложняется, если нет прочной теоретической базы, т.е. достоверной физико-химической модели явлений, протекающих в конвертерной ванне при продувке металла кислородом. Без нее невозможно описать процессы тепло- и массопереноса в ванне; разработать научные методики расчета форм и конвертеров, эффективные системы автоматизации; совершенствовать конвертерные процессы и прогнозировать пути их развития. В последние годы многое сделано для создания такой модели.

При изучении конвертерных процессов и разработке их моделей используются все основные виды исследований: теоретические, лабораторные, промышленные, полупромышленные.

В теоретических исследованиях процессов окисления и удаления примесей /*Si, Mn, P, S, V, Cr* и др./ при продувке металла широко используют термодинамический анализ /определение констант равновесия, коэффициентов активности/.

При этом учитывается, что отдельные реакции, особенно на границе шлак - металл и в зонах взаимодействия, очень близки к равновесию, а фактические содержания примесей в металле на протяжении значительной части плавки изменяются симбатно равновесным концентрациям и в конце продувки обычно приближаются к ним. В расчетах следует использовать известные положения химической термодинамики и кинетики, теории растворов, аэрогидродинамики и др.

Более сложны расчеты кинетики процессов окисления компонентов ванны, необходимые для выявления путей снижения примесей в металле, общих закономерностей динамики рафинирования. Эти расчеты усложняются многообразием характером процессов, включающих в себя кинематические и диффузионные акты, и еще недостаточной изученностью механизма отдельных реакций, характера температурных и скоростных полей /гидродинамики/ в реакционной зоне и в ванне в целом. Поэтому расчеты часто заканчиваются качественным анализом. Обычно они выполняются с позиций лимитирования процессов окисления диффузионными звеньями /массопереносом в шлаке/.

Исследователи разрабатывают математические модели тепло- и массообменных процессов как в ванне в целом, так и в отдельных ее участках /реакционная зона, капля, пузырь/ для уточнения температурных и концентрационных полей, неоднородности ванны. Чтобы успешно решить по-

ставленные задачи, необходимо знать общие закономерности тепло- и массопереноса и уточнить некоторые детали физико-химической модели явлений в ванне, их механизм. Известно, что чем точнее физико-химическая модель, тем лучшие результаты с точки зрения приближения к натуре дает математический анализ.

Применение ЭВМ при математическом моделировании конвертерного процесса позволяет усложнить задачи, учитывать изменение теплофизических параметров фаз ванны во времени и в пространстве, конкретные граничные условия и за счет этого также приближать результаты расчетов к натуре.

В лабораторных исследованиях процесса продувки применяется как холодное, так и горячее моделирование. Длительное время для изучения характера взаимодействия газовой струи с жидкостью при разных методах подвода дуги к ванне /снизу, сбоку, сверху/, размеров зоны взаимодействия, гидродинамики ванны /скоростных полей/, влияния конструкции фирм на процессы в ванне исследователи /Тринко, Мак-Кеффери, Каменский, Казанцев, Леруа, Иванцов, Баптизманский и др./ применяли в основном холодное моделирование.

Установлено, что для обеспечения подобия процессов в модели и образце /конвертере/ необходимо соблюдать геометрическое подобие, идентичность состояния струи на выходе из сопла /равенство чисел Маха $M = V/C$ / и режимов взаимодействия дуги с жидкостью. Последнее для жидкостей с малой вязкостью достигается при равенстве модифицированного числа Вебера

$$We_{kp} = \frac{G_m}{P_m g L_{kp}^2} = \frac{G_m \rho_m g}{h_{kp}^2}, \quad /9.1/$$

где L_{kp} , h_{kp} - соответственно глубина реакционной зоны /лунки/ и динамический напор на оси струи на поверхности встречи с жидкостью при переходе от одного режима взаимодействия к другому /открытая лунка со стабильной поверхностью, открытая лунка с выносом брызг; глубокое проникновение струи/.

В случае холодного моделирования, широко применяемого в практике донной продувки ванны нейтральным газом, следует учитывать его расширение в образце при нагреве до температуры металла.

Чтобы обеспечить возможность наблюдения явлений, модели изготавливают полностью или частично из прозрачных материалов. При изучении общего характера аэрогидродинамических процессов, формы и размеров зоны взаимодействия применяют объемные модели конвертера. В некоторых случаях для выясне-

ния внутренней структуры реакционной зоны и ее "рассечения" используют плоские модели или приближают форму /струю/ к прозрачной стенке. Исследования показали, что это существенно не влияет на размеры зоны и характер процессов в ней.

Для продувки в моделях применяют как неассимилируемые /воздух в воду/, так и хорошо ассимилируемые жидкостью газы. В последнем случае в газ желательно вводить вещества, вызывающие в жидкости вторичные реакции с газовыделением, моделирующие процесс окисления углерода в ванне /кипение/.

На холодных моделях можно изучать не только характер взаимодействия фаз, гидродинамику ванны, механизм и закономерности выноса и выбросов, но и массоперенос компонентов /коэффициенты массопередачи, эффективные коэффициенты турбулентной диффузии/. Для этого целесообразно применять электромеханические методы. Характер циркуляции изучают с помощью трассеров, а скоростные поля – с помощью трассеров и трубок Пито.

Для фиксации размеров реакционной зоны, циркуляционных потоков, всплесков, кроме визуальных наблюдений, следует применять скоростную киносъемку, фотографирование с очень короткими выдержками, стробоскопы. Результаты таких исследований могут быть использованы при определении рациональной конструкции форм, мер борьбы с выносом, выбросами и решении других практических задач.

Холодное моделирование обеспечивает лишь приближенное подобие явлений, так как в натуре протекают процессы горения, химического взрыва капель и другие, которые не могут быть полностью реализованы в указанных исследованиях.

Горячее моделирование проводится в малых конвертерах вместимостью от нескольких до сотен килограммов продувкой жидкого Fe-C расплава кислородом. Установлено, что достаточная идентичность процесса продувки в малых агрегатах и промышленных конвертерах обеспечивается при соблюдении геометрического подобия и одинаковых значениях основных параметров дутьевого /интенсивность продувки, конструкция формы/ и шихтового /тип присадок, время ввода/ режимов плавки. Некоторое различие в тепловых потерях для агрегатов разной вместимости может быть нейтрализовано индукционным нагревом металла в модели или перегревом чугуна перед продувкой.

При горячем моделировании в качестве конвертера удобно использовать переоборудованную лабораторную индукционную печь. Такие агрегаты применяют в начальной стадии исследований технологического характера,

результаты которых целесообразно затем проверять на полупромышленных агрегатах. Для изучения структуры ванны, реакционной зоны, отдельных физико-химических явлений в ванне используют специальные модели.

Определенную информацию о форме и размерах реакционной подформенной зоны можно получить "просвечиванием" продуваемой ванны с помощью бетатрона. Однако этот метод дает весьма приближенные результаты. Параметры реакционной зоны выявляются также по контуру оплавления специально устанавливаемых перед продувкой в конвертер /в районе зоны/ решеток и стержней. После кратковременной продувки жидкый металл выливают из конвертера, затем осматривают остатки решеток /стержней/. Так получают информацию о форме и размерах внутренней высокотемпературной части реакционной зоны.

Наиболее полные данные о реакционной зоне и происходящих в ней процессах можно получить с помощью разработанного в ДМетИ метода ее визуализации путем продувки металла в тигле /конвертере/ с прозрачной кварцевой стенкой через форму, установленную вблизи этой стенки /рис.9.1/.

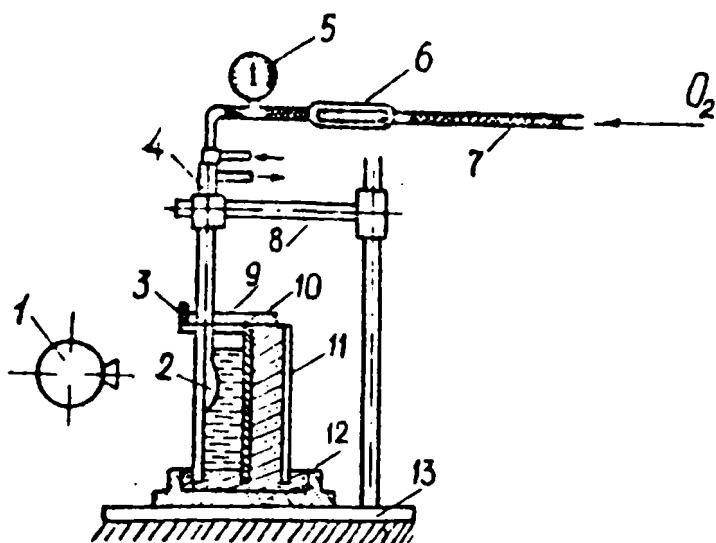


Рис.9.1. Схема установки для продувки чугуна в тигле с прозрачной стенкой: 1 - кинокамера; 2 - реакционная зона; 3 - защитный козырек; 4 - форма; 5 - контрольный манометр; 6 - ротаметр; 7 - шланг для подачи кислорода; 8 - устройство для крепления формы; 9 - отверстие для формы и отходящих газов; 10 - крышка; 11 - кварцевый тигель; 12 - поддон; 13 - стенд.

Для фиксации процессов применяются скоростная киносъемка и фотографирование. На основе этого метода получены новые данные о структуре реакционной зоны, установлены наличие в ней первичной высокотемпературной и вторичной частей, характер циркуляционных потоков. Метод пригоден

для изучения процессов взаимодействия реакционных зон /многоструйная продувка/, характера газовыделения в ванне, механизма возникновения всплесков и других явлений.

При изучении характера газовыделения на периоды ванны и ее структуры в указанной области применяют модель с обычным центральным расположением фурм; в стенке конвертера в этом случае делают окно из прозрачного кварца /методика СМИ/. Другие окна /открытые или закрытые прозрачным материалом/ в шлемовой части конвертера используют для наблюдений и съемки явлений, протекающих вверху ванны.

В целях изучения изменения интенсивности газовыделения из ванны по ее радиусу /горизонтали/ применяют иногда многокамерные /обычно двухкамерные/ тигли-конвертеры /рис.9.2/, имеющие вверху ванны разделяльные перегородки и общую крышку с отверстиями для выхода газов. При этом кислород вводится через фурму только в одну камеру, а газы отводятся отдельно из каждой камеры. Модели примерно такой же конструкции можно применять и для изучения состава первичного шлака, образующегося в разных участках ванны.

Содержимое первой реакционной зоны при продувке сверху можно отбирать с помощью специальных относительно легкоплавких керамических или быстро прогорающих вставок, установленных в днище лабораторного конвертера. Вскоре после начала продувки в нижней части конвертера образуется /выжигается/ отверстие определенных размеров, из которого выдувается газожидкостная смесь /конденсированные частицы этой смеси закаливаются в специальной жидкости, расположенной под днищем конвертера/. Наиболее стабильные результаты при этом достигаются в случае использования конвертеров проточного типа, позволяющих поддерживать постоянный средний состав металла в ванне /рис.9.3/.

В ряде работ установлено, что продувка окислительным газом в промышленных агрегатах сопровождается эмиссией металла в струю, дроблением и образованием капель, которые являются основными переносчиками кислорода и энергии от дутья к ванне. В связи с этим используется ряд методик исследования процесса взаимодействия капель металла с окислительным газом. Относительно крупные частицы размером порядка 0,1...3 мм,

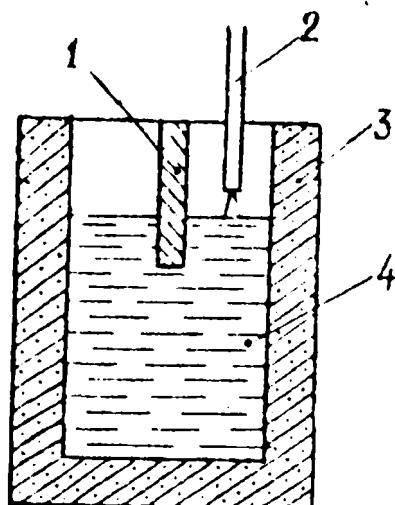


Рис.9.2. Схема двухкамерного тигля-конвертера: 1 - перегородка; 2 - фурма; 3 - тигель; 4 - ванна

тические для установок струйного рафинирования и периферийных участков реакционной зоны, подвешиваются в электромагнитном поле и обдуваются кислородсодержащим газом. После за-калки окисленных капель исследуют их состав и структуру.

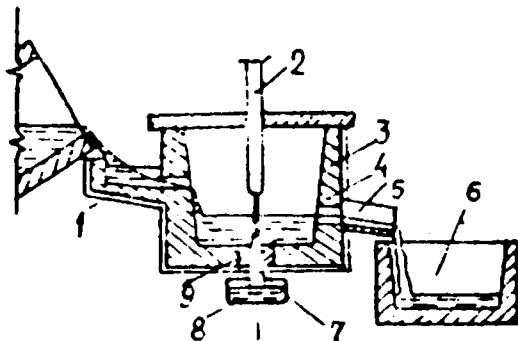


Рис.9.3. Схема установки для улавливания продуктов первичной реакционной зоны: 1 - носок; 2 - фурма; 3 - магнезитовая набивка; 4 - проточный гигель; 5 - выливной носок; 6 - колпачник; 7 - отверстие; 8 - пробоотборник; 9 - магнезитовая плита

При изучении взаимодействия более мелких капель /частиц/ диаметром порядка 0,1 мм, типичных для внутренних участков первичной реакционной зоны, хорошие результаты дает метод треков. В этом случае капли или твердые $Fe-C$ частицы дозированно вводятся сверху в специальной установке в поток нагретого окислительного газа, например, кислорода, где они окисляются и горят. Газ в установке нагревается с помощью спе-

циальной печи с силиловыми спиральными трубками, куда и вводятся частицы металла. Под трубкой укреплена мерная линейка с подсветкой. Треки горящих частиц фотографируют через врачающийся диск-обтуратор с отверстиями. После этого исследуются структура и состав сгоревших частиц. В лабораторных конвертерах применяют обычные же методы отбора проб, определения температуры, уровня ванны, как и в полномасштабных агрегатах, но измерения проводят чаще.

Промышленные исследования включают в себя проведение сначала отдельных плавок, а затем серий /кампаний/ по опытной технологии или специальных плавок для изучения различных явлений, протекающих в конвертере, с помощью обычной или особой аппаратуры. Содержание опытной технологии определяется в зависимости от основной цели исследования. Конкретными задачами промышленных исследований могут быть поиск принципиально новых вариантов процесса, конструкций конвертеров, типов устройств для ввода окислителя /фуры, днища/, дутьевых и плаковых режимов, методов ввода основных шихтовых материалов и флюсов; испытания новых приборов для контроля хода продувки, материалов, оgneупоров; получение новых данных для углубления знаний о закономерностях конвертерных процессов.

В промышленных исследованиях конвертирования применяют различные методы.

Хронометраж плавок . При использовании этого метода фиксируется время отдельных операций плавок: загрузки шихты, продувки и др.

Балансовые плавки проводятся с точным взвешиванием, измерением объема, отбором проб и анализом всех исходных материалов, продуктов и погерь /стали, шлака, газов, пыли, выбросов и др./. В конвертерных газах в ряде случаев выделяется пылевидная составляющая, подвергающаяся фракционному и микроскопическому анализу. В шлаке определяют содержание "корольков" /капель металла/. С помощью специальных приспособлений улавливают вынос и выбросы.

Визуальные наблюдения ведутся за ходом всех или отдельных операций плавки, за явлениями, сопровождающими продувку /выбросы, вынос, выбивание газов, факела и др./, за футеровкой конвертера до и после плавки /серии плавок/, состоянием ванны, шлака после продувки, отверстия, истекающей из него струи и др. Установленные особенности фиксируются в специальном журнале.

Фото- и киносъемка выполняется для более точной фиксации явлений. Жидкие сталь, шлак, факел, а также горячую футеровку необходимо снимать со светофильтрами /обычно синими/. Для установления требуемых выдержки и диафрагмы желательно выполнять пробные съемки.

Отбор проб металла, шлака осуществляется для определения их химического состава, содержания неметаллических включений в металле, структурно-фазового анализа. Пробы отбирают ложками или специальными пробницами. Для отбора проб на металлические включения и газы из конвертера и ковша используют пробницы, закрытые деревянной или керамической пробкой /рис.9.4,а/ и обеспечивающие быстрое замораживание металла. Пробка прикручивается медной проволокой, которая в жидким металле быстро расплавляется. После этого крышка вслывает и пробница на требуемой глубине заполняется жидким металлом. Время отделения крышки регулируется подбором диаметра медной проволоки.

Для взятия небольших проб металла в ряде случаев применяют трубки из кварца или тугоплавкого стекла. При этом на одном конце трубки стекло разогревается и выдувается емкость, затем в трубке создается вакуум и другой конец ее запаивается /рис.9.4,б/. После погружения в металл этот конец расплавляется, металл затекает в трубку и затвердевает. Для извлечения пробы трубку разбивают. Наиболее просто отбирать пробы металла и шлака из конвертера перед продувкой и после нее, т.е. при поливке конвертера. Однако они недостаточно точно характеризуют состав фаз и состояние продуваемой ванны.

Для отбора проб металла и шлака из конвертера непосредственно в ходе продувки исследователи применяют устройства, состоящие из металлического гроса, стальной штанги с одной или с несколькими пробницами, расположенными на разных уровнях по высоте, и утяжелителем на конце из металла большей плотности, чем сталь. Последнее обеспечивает погружение штанги в ванну. Для опускания и подъема штанги используется специальный простой механизм. Таким путем можно изучать структуру и состав ванны на различных горизонтах, ее уровень.



Рис.9.4. Пробники для отбора проб металла:
1 - пробница; 2 - деревянная крышка;
3 - медная проволока

В промышленных конвертерах для обычного контроля состава и температуры ванны в ходе продувки применяют водоохлаждаемые зонды /подобные фурме/, которые периодически вводят в ванну через отверстия в кессоне. Чтобы пробы и данные о температуре были достоверными, т.е. характеризовали средние измеряемые параметры ванны, необходимо правильно выбрать положение зонда. По температуре кристаллизующегося металла /ликвидуса, солидуса/ можно приблизительно определить и содержание углерода в нем.

Измерение температуры необходимо, чтобы определить температурный режим плавки и изучить теплообменные процессы в ванне. Кратковременные измерения температуры жидкого металла /шлака/ перед продувкой или при повалках конвертера производят обычными термопарами погружения. Для длительных непрерывных измерений температуры металла в конвертере или в футеровке /для фиксации температурных полей/ применяют термопары, заделанные в кладку агрегата. При измерениях температуры жидкого металла используют как обычные кварцевые, так и высокостойкие колпачки из диборида циркония. Они выдерживают без замены 10-20 плавок. Наконечник термопары несколько выступает из футеровки; место ее установки подбирают таким, чтобы разница показаний данной термопары и термопары погружения была минимальной. Температурные поля в футеровке рекомендуется изучать с помощью блоков термопар. Для регистрации температур используют переносные самопишущие потенциометры.

Некоторую приближенную информацию о температуре верхних слоев ванны можно получить, измеряя ее оптическим пирометром, вводимым в конвертер с помощью водоохлаждаемой трубы – фурмы. В целях защиты установки от брызг металла применяется отдув аргоном или азотом. Для измерения температур в первичной реакционной зоне оптический пирометр устанавливают в верхней части продувочной кислородной фурмы.

Измерение уровня ванны особенно важно при изучении механизма выноса и выбросов. Механические устройства пригодны лишь для дискретных измерений. В целях непрерывного слежения за уровнем ванны в динамических системах автоматизации контроля и управления кислородно-конвертерной плавкой измеряют интенсивность шума в определенном диапазоне частот /около 1000 Гц/ и вибрации конвертера. По мере подъема уровня ванны интенсивность сигнала, связанного с процессами горения и взаимодействия струи кислорода с металлом, снижается. При небольшом вспучивании ванны /шлакометаллической эмульсии/ наиболее точную информацию об уровне ванны дает акустическая, а при значительном – вибрационная характеристика.

Существенная информация об уровне ванны может быть получена при непрерывном контроле температуры воды, охлаждающей фурмы /растет с подъемом ванны/, а также при измерении электропроводности ванны на участке фурма – ванна. В последнем случае достаточно четко фиксируется момент приближения ванны к фурме и затопление последней.

Процессы массопереноса изучались путем ввода в ванну хорошо растворимых в железе и неокисляющихся металлов /медь, никель/ или изотопов фосфора, серы. Их помещали в определенные участки ванны в специальных капсулах или в кусках лома, а из других участков отбирали пробы жидкого металла, которые затем исследовали.

При изучении отдельных явлений в конвертерной ванне возникает необходимость в получении специальной информации с помощью принципиально новых или известных, но видоизмененных методов. В последнее время начинают использовать /в основном в лабораторных исследованиях/ проникающие излучения, лазеры, измеряю физические свойства ванны и т.д. Понятно, в дальнейшем эти методы будут применяться и в производственных условиях.

Чтобы уменьшить вероятность аварийных ситуаций и предотвратить снижение производительности агрегатов в промышленных исследованиях при существенных изменениях технологии и конструкций, в ряде случаев проводят промежуточные полупромышленные испытания в конвертерах вместимостью 10...30 т.

§ 2. Исследование марганцовского процесса

Марганцовский процесс – один из главных способов производства стали, которым выплавляли основную массу металла в первой половине нашего века. После промышленного освоения кислородно-конвертерного процесса доля марганцовской стали начала резко сокращаться. В нашей стране она пока еще превышает 50%.

Предусматривается техническое перевооружение ряда отраслей промышленности, в том числе и черной металлургии. При этом марганцовские цехи будут постепенно заменены конвертерными и электросталеплавильными. Однако до конца нынешнего века выплавка марганцовской стали в стране останется довольно значительной. В связи с этим исследованиям в области марганцовского производства уделяется достаточно большое внимание.

Основные направления научных исследований марганцовского процесса следующие.

1. Совершенствование и интенсификация технологии марганцовской плавки. Обеспечивается в результате широкого применения кислорода /значительно увеличивается производительность печей/. В ходе исследований разрабатываются оптимальные способы подачи кислорода в печь, создаются рациональные конструкции кислородных фирм, изыскиваются возможности экономии чугуна.

2. Совершенствование тепловой работы печей. Достигается в результате повышения их тепловой мощности, улучшения параметров факела /жесткости, светимости, температуры/ при одновременном снижении удельного расхода топлива.

3. Улучшение подготовки шихты и ускорение ее завалки. Сокращение времени завалки шихты обеспечивает рост производительности печей, что может быть достигнуто за счет повышения плотности лома, увеличения мощности завалочных машин, реконструкции передней стенки печи. Улучшение качества чугуна и лома, уменьшение их загрязненности вредными примесями, цветными металлами способствуют повышению качества производимой стали. Для этого применяют методы предварительной обработки чугуна /обессеривание магнием, известью, обескремнивание продувкой воздухом/.

4. Вдувание пылевидных материалов в ванну. Применяется в целях интенсификации шлакообразования, снижения содержания вредных примесей /серы и фосфора/ в стали, предварительного раскисления металла /вдувание графита или других углесодержащих материалов/. В марганцовской технологии это обеспечивает снижение удельных расходов материалов /шлакообразующих, раскислителей и в ряде случаев чугуна/, повышение качества стали, а также увеличение производительности печей.

5. Разработка новых методов контроля. Необходима для создания эффективных АСУ ТП.

6. Применение новых огнеупоров. Позволяет повысить срок службы отдельных элементов печей, сократить продолжительность ремонтов и затраты на футеровку.

7. Установление оптимальных режимов раскисления. Обеспечивается изменением режимов ввода раскислителей в металл, снижением окислительности металла и шлака в печи, уменьшением количества шлака, поступающего в ковш, а также использованием новых типов раскислителей, необходимых для выпуска прогрессивных марок сталей, и экономией дефицитных ферросплавов.

8. Оптимизация ковшовой обработки. Достигается в результате продувки металла в ковше инергными газами, обработки шлаковыми смесями, вакуумирования металла.

9. Совершенствование технологии выплавки стали в двухванных стальеплавильных агрегатах. Достигается на основе разработки рационального режима продувки, шлакообразования, методов контроля плавки и расширения сортамента выплавляемой стали, повышения ее качества, экономии энергетических и сырьевых ресурсов.

10. Разработка мер по охране окружающей среды. Мартеновские печи, особенно работающие о применением кислорода, являются источниками выбросов в атмосферу пыли и ряда токсичных веществ - оксидов азота, серы, CO и др. Охране окружающей среды посвящены проектно-конструкторские разработки /реконструкция агрегатов с установкой газоочисток/ и технологические решения, обеспечивающие снижение вредных выбросов.

В области мартеновского производства ведутся теоретические, лабораторные и промышленные исследования.

В процессе теоретических исследований на основе анализа термодинамических данных определяют оптимальные технологические условия плавки, обеспечивающие нужную степень удаления вредных примесей, заданную окисленность металла перед выпуском, оптимальные условия раскисления стали. Большое место в теоретических исследованиях занимают расчеты материального и теплового балансов плавки или отдельных технологических периодов. В результате этих расчетов уточняются шихтовка плавки, расходы сырых материалов и раскислителей.

Математическое моделирование применяют при изучении физико-химических процессов, протекающих в мартеновских ваннах /окисление примесей, гидродинамика, тепло- и массообмен/, имитации плавки в целом. Эти результаты используются как для совершенствования технологии плавки, так и для разработки систем управления процессом.

В лабораторных исследованиях применяют холодное и горячее моделирование. Для изучения гидродинамики взаимодействия дутья с ванной, перемешивания жидкой ванны, движения газов в печи используют холодное моделирование. В этом случае применяют различные трассеры и индикаторы, позволяющие наблюдать потоки в жидких фазах, фото- и киносъемку.

Взаимодействие металла со шлаком, огнеупоров с металлом и шлаком, процессы растворения извести и плавления металлического лома исследуют с помощью горячего моделирования. При изучении процессов на горячих моделях отбирают пробы металла и шлака, измеряют температуры жидких фаз, проводят петрографические исследования образцов шлака и огнеупоров. Кинетические характеристики исследуемых процессов определяют по уменьшению массы растворимых образцов, скорости изменения концентрации одного из компонентов расплава и состава газовой фазы.

В мартеновском производстве наиболее широко ведутся промышленные исследования. Основные методы, применяемые в этом случае, аналогичны используемым при изучении кислородно-конвертерных процессов и заключаются в контроле и наблюдении за ходом плавок, использовании различного рода индикаторов, позволяющих изучать отдельные процессы в ванне; проведении балансовых плавок; статистической обработке данных. При наблюдении и контроле за ходом процесса проводятся хронометраж отдельных периодов, операций и плавки в целом; визуальные наблюдения за поведением ванны, факела, состоянием металла и шлака, футеровкой печи; отбор проб металла, шлака и газов для дальнейшего анализа; измерение температуры ванны, газов и отдельных элементов кладки. Пробы берут по принятой в цеховой практике методике — пробной ложкой из среднего завалочного окна в стаканчик или на "скрапину", начиная с момента расплавления ванны и до выпуска. Шлак для анализа берется с пробной ложки или из печи сразу после извлечения пробы металла.

Иногда изготавливают специальные пробницы, с помощью которых одновременно отбирают ряд проб металла по глубине, длине и ширине ванны. Эти пробницы, как правило, громоздки, для их погружения в ванну используют завалочную машину. На таких пробах изучают неравномерность состава металла и шлака в ванне, например, в зоне продувки металла кислородом. Специальные пробницы изготавливают также при отборе проб металла для определения содержания в нем кислорода, неметаллических включений, газов /см. § I/.

При контроле температуры ванны можно использовать термопары для разовых измерений или данные о непрерывном измерении температуры металла, если печь оборудована соответствующей установкой. В большинстве марганцовских цехов температуру ванны измеряют вольфрамомолибденовыми или вольфрамрениевыми термопарами, имеющими относительно большую погрешность. Поэтому для повышения точности измерений можно рекомендовать платиновые или платинородиевые термопары. Хронометраж отбора проб и измерений температуры обязателен.

Один из важных методов исследований в марганцовских цехах – балансовые плавки. При их проведения строго учитывают все материалы, поступающие в печь; определяют их состав, массу металла в слитках, в надоливках, в виде скрапа; взвешивают количество спускаемого и конечного шлаков; анализируют их состав. При проведении балансовых плавок часто встречаются организационные трудности, связанные с недостаточным количеством смешного оборудования в цехе, транспорта и др. Балансовые плавки позволяют проанализировать все виды потерь металла, уточнить расходные коэффициенты шихтовых материалов, тепловой баланс процесса.

Для изучения механизма и кинетики процессов, протекающих в ванне печи, применяют различные индикаторы, в том числе радиоактивные изотопы. С их помощью можно исследовать кинетику плавления металлического лома, растворение шлакообразующих материалов, неравномерность состава и перемешивание металла и шлака в ванне. С радиоактивными изотопами можно работать только на заводах, имеющих специально оборудованные лаборатории и обученный персонал. Количество вводимых в печь радиоактивных изотопов должно быть строго ограничено существующими нормами, обеспечивающими безопасные условия для персонала цехов и исследователей. В качестве индикаторов используют изотопы веществ, растворяющихся только в одной из реагирующих фаз – металле или шлаке. Так, для металла это могут быть изотопы золота или рутения, которые практически не переходят в шлак, для шлака – изотопы бария. В ряде случаев используют изотопы элементов, распределяющихся между металлом и шлаком, например, серы или фосфора.

Статистические методы исследований основаны на анализе паспортных данных плавок валового производства и больших массивов экспериментальных данных. При этом чаще всего применяют метод множественной корреляции, который позволяет определить зависимость одного из показателей работы печи, процесса от ряда факторов, например, производительности печи от состава шихты, расхода кислорода, длительности организационных периодов плавки и т.д. Этот метод позволяет установить долю влия-

ния каждого фактора на изучаемый параметр. С помощью статистических методов сравнивают показатели плавок валового массового и экспериментального крупносерийного производства. Например, сопоставляют средние показатели и другие характеристики выборок двух кампаний печи по оводу, проведенных по разным технологическим режимам. Такое сравнение наиболее результативно при оценке эффективности новой технологии.

§ 3. Исследования в области электросталеплавильных процессов

Трудно назвать область современной техники, где можно обойтись без легированных и высоколегированных специальных сталей и сплавов. Применение в промышленности новых видов сталей и сплавов специального назначения обусловило необходимость ускоренного развития качественной металлургии и, в частности, электросталеплавильного производства.

Основное количество легированных и высоколегированных сталей выплавляют в дуговых электропечах вместимостью от 5 до 200 т. При выплавке стали дуговые электропечи обладают рядом существенных технологических преимуществ перед другими сталеплавильными агрегатами: возможностью быстрого расплавления твердой шихты из лома и металлизированных окатышей и точного регулирования температуры жидкого металла в узких пределах, низким угаром железа и легирующих элементов, лучшими условиями рафинирования металла от вредных примесей и др.

Основные направления исследований в условиях современного электросталеплавильного производства.

1. Изучение теоретических основ выплавки стали в дуговых печах, в частности, кинетики взаимодействия металла, шлака и газов. Разработки в области кинетики окислительных /удаление углерода, фосфора/ и восстановительных /удаление серы, кислорода, легирование металла/ процессов электроплавки позволяют создать оптимальные с точки зрения качества металла технологические схемы производства электростали с проведением отдельных операций в специализированных агрегатах внепечной обработки.

2. Поиск способов подготовки стального лома, обеспечивающих повышение его качества и утилизацию денных элементов. Поступающий в переплав легированный лом значительно загрязнен примесями цветных металлов /свинца, меди, олова и др./, в том числе из покрытий стальных изделий. Эти примеси при плавке практически полностью переходят в металл, снижая его качество. Необходим поиск новых, химико-металлургических способов переработки электропечного лома в целях извлечения примесей цветных металлов для их последующей утилизации.

Несмотря на значительное увеличение производства электроэнергии и снижение ее стоимости нагрев электрическим током остается более дорогим, чем, например, за счет сжигания низкокалорийного газа или геплоты, получаемой от ядерных реакторов. Поэтому представляется интерес поиск экономических способов безокислительного нагрева лома до 1000...1200 °С с использованием жидких и газообразных теплоносителей.

3. Математическое описание закономерностей основных процессов электросталеплавильного производства. Это необходимо для решения задачи комплексной автоматизации электроплавки стали в дуговых печах.

4. Исследование особенностей выплавки электростали из металлизованных окатышей. По физическим свойствам и химическому составу металлизованные окатыши существенно отличаются от традиционной шихты – стального лома. Это определяет иной характер плавления окатышей и поведение содержащихся в них химических элементов.

5. Совершенствование конструкции и определение рациональных режимов работы дуговых сталеплавильных печей. Современные дуговые печи оснащаются водоохлаждаемыми элементами стен и свода, что увеличивает стойкость футеровки до 1000 плавок. Увеличение удельной мощности дуговых печей с 250...350 до 500...700 и даже до 1000 кВ·А/т резко сокращает продолжительность расплавления лома и увеличивает производительность электропечей. Однако выплавка легированных сталей в сверхмощных дуговых печах имеет особенности, знание которых необходимо для оптимизации технологии плавки.

6. Влияние технологии плавки на качество электростали широкого сортамента.

В области электросталеплавильного производства проводятся географические, лабораторные и промышленные исследования.

Цель теоретических исследований – термодинамический анализ поведения легирующих и примесных элементов в стальной ванне при электроплавке стали, а также определение растворимости газов в легированных сталях различного состава. Активность компонентов металла обычно рассчитывают по методу Вагнера, шлака – по методу Кожеврова и Пономаренко, растворимость газов – по методу Шормана – Кунце. Теоретические исследования позволяют определить основные параметры оптимальной технологии плавки. Важная задача теоретических исследований – математическое моделирование физико-химических процессов, протекающих в ванне дуговой сталеплавильной печи. Эти исследования необходимы для разработки систем управления процессом электроплавки.

В лабораторных исследованиях электросталеплавильного процесса используют холодное и горячее моделирование. Холодное моделирование в основном применяют для изучения гидродинамики и массообмена в стальной ванне при различных вариантах кислородной продувки металла. Это позволяет разработать рациональную конструкцию дутьевых устройств. Горячее моделирование чаще всего направлено на исследование механизма плавления металлической шихты, взаимодействия жидкого металла со шлаком, газовой фазой и огнеупорами. Механизм плавления лома и металлизованных окатышей изучают погружением проб /неподвижных и вращающихся/ в расплав на определенный срок с последующим извлечением и закаливанием. Полученные образцы используются для исследования структурных, химических и фазовых превращений, происходящих в процессе нагрева и плавления.

Взаимодействие легированного металла со шлаком и огнеупорами изучают отбором проб металла и шлака в состоянии равновесия при длительной высокотемпературной выдержке в огнеупорных тиглях. Для исследований реакций в системе металл – газовая фаза с успехом используют плавку во взвешенном состоянии в высокочастотной индукционной установке. Кинетику многофазных взаимодействий исследуют по скорости изменения концентрации одного из компонентов расплава и состава газовой фазы.

Окончательно оптимальные параметры технологического процесса выбирают по результатам полупромышленных или промышленных исследований. В ходе промышленных опытов проводится контроль за ходом плавок, балансовые плавки и статистическая обработка данных.

При контроле за ходом процесса осуществляют хронометраж отдельных периодов и плавки в целом; визуальные наблюдения за состоянием металла, шлака и футеровки; отбор проб металла и шлака по ходу плавки; измерение температуры металла и футеровки.

Металл отбирают из электропечей по ходу плавки в стальные стаканчики, закрытые деревянными крышками. Шлак для анализа отбирают из печи сразу после извлечения пробы металла. Пробы высоколегированного металла обычно получаются плотными, без раскисления алюминием. При контроле температуры ванны в электропечах обычно для разовых измерений используют вольфрамовые термопары, предварительно отградуированные по платиновой термопаре.

Важное место в промышленных исследованиях занимают балансовые плавки. Для составления материального баланса контролируют состав и массу всех материалов, поступающих в печь, и продуктов плавки. Балан-

совые плавки позволяют уточнить расходные коэффициенты шихты, определить все виды потерь металла. Для определения теплового баланса процесса дополнительны необходимы измерения температуры металла, шлака и фугеровки печи по ходу плавки.

Статистическая обработка основана на анализе паспортных данных плавок текущего производства. Чаще всего применяют метод множественной корреляции, позволяющий исследовать долю влияния каждого фактора на изучаемый параметр. С помощью дисперсионного анализа сравнивают показатели плавок по обычной /принятой/ и опытной технологии. Такое сравнение обеспечивает объективную оценку эффективности новой технологии.

§ 4. Исследование процессов спецэлектрометаллургии

Для изготавления ряда машин и аппаратов требуется металл особо высокого качества, который невозможно получить по традиционной технологии металлургического производства. Такой металл получают методами спецэлектрометаллургии за счет рафинирующего переплава металлических электродов в криоталлизатор. Производство сталей и сплавов для нужд реактивной авиации, атомной энергетики, электроники и других новых отраслей техники потребовало создания принципиально новых сталеплавильных процессов: электрошлакового переплава /ЭШП/, вакуумного дугового переплава /ВДП/, плазменно-дугового переплава /ПДП/, электронно-лучевого переплава /ЭЛП/, вакуумного индукционного переплава /ВИП/.

При ЭШП исходный металл в виде расходуемого электрода расплавляется при погружении в жидкий перегретый флюс. Этот флюс нагревается при прохождении через него электрического тока и обладает рафинирующими свойствами по отношению к переплавляемому металлу. Рафинированный металл кристаллизуется в водоохлаждающем кристаллизаторе.

В широких промышленных масштабах ЭШП был впервые применен в нашей стране, где построена самая крупная в мире 6-7-электродная установка ЭШП для производства слитков массой до 200 г. ЭШП применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить изотропность механических и физических свойств металла или повышенные требования к свариваемости, пластичности и вязкости металла. Поэтому на установках ЭШП переплавляют не только дорогие легированные, но и недорогие низколегированные трубные стали. ЭШП имеет определенные технологические недостатки: невозможность удаления из металла фосфора и водорода, а также устойчивое сохранение некоторых легирующих элементов.

При ВДП расходуемый электрод расплавляется электрической дугой постоянного тока с рафинированием жидкого металла в вакууме. В отличие

от ЭШП при ВДП исходное содержание водорода в металле может быть снижено на 90–95%. Одновременно удаляется 30–70% кислорода и 30–40% азота, растворенных в исходном металле. В печах ВДП рафинируют жаропрочные, коррозионностойкие, инструментальные стали и сплавы, предназначенные для лопаток турбин, камер сгорания реактивных двигателей, химической промышленности и атомной энергетики.

ВИП, в отличие от ВДП, позволяет выплавлять в высокочастотных электропечах сплавы самых сложных составов практически из любых шахтowych материалов, регулировать по ходу плавки химический состав металла. По дегазирующей способности ВИП превосходит ВДП, однако имеет существенный недостаток – загрязнение металла угнеупорным материалом тигля.

ПДГ основан на расплавлении исходного металла за счет энергии плазмы, получаемой в плазмотроне при пропускании газа через электрическую дугу. Использование в качестве плазмообразующего газа аргона позволяет получить сложнолегированные стали и сплавы, содержащие легкоокисляющиеся элементы *(Al, Ti, Zr)*, при применении азота – стали, легированные азотом. В нашей стране работают плазменные печи вместимостью до 12 т. При выплавке сложнолегированных сталей и сплавов в печах ПДГ экономия за счет сокращения угаря легирующих элементов составляет в среднем 25–30 руб. за 1 т по сравнению с выплавкой их в открытых дуговых печах.

При электронно-лучевом переплаве источником теплоты служит кинетическая энергия сфокусированного пучка электронов. Переплав осуществляется в глубоком вакууме, что обеспечивает более низкое содержание газов, чем в металле ВДП и ВИП.

Несомненные преимущества ЭЛП и ПДГ – применение источника теплоты, не зависящего от вида и объема обрабатываемого металла; высокая плотность энергии; возможность использования контролируемой атмосферы, регулирования состава металла и управления скоростью кристаллизации, а также переработки лома и отходов, содержащих легкоокисляющиеся элементы, тугоплавких и высокоактивных металлов.

Развитие процессов спецэлектрометаллургии требует изучения таких фундаментальных вопросов, как физика электрических дуг постоянного и переменного токов и плазмы; кинетика и термодинамика процессов растворения газов в металлах и шлаках, испарения, раскисления, десульфурации, обезуглероживания при высоких температурах; кинетика испарения и массообмена в системе газ – металл в широком диапазоне давлений $5 \cdot 10^5 \dots 0,1$ Па с учетом специфики взаимодействия дугового и плазменно-го разрядов; физико-химические характеристики шлаковых и металлических расплавов, используемых в процессах спецэлектрометаллургии.

В области спецэлектрометаллургии можно выделить такие темы научных исследований прикладного характера.

1. Совершенствование существующих и создание новых электрических и конструктивных схем установок для переплава.
2. Исследование влияния технологических факторов на эффективность рафинирования металла при различных видах переплава.
3. Изучение влияния многократного или комбинированного переплава на качество получаемого металла.
4. Исследование возможности дополнительного легирования и модификации металла в процессе переплава.
5. Совершенствование оборудования и технологии переплава для получения крупнотоннажных слитков при ЭШП, ВДЛ, ЭЛП, ПДЛ.
6. Определение технико-экономической эффективности переплава конвертерной и марганцовской стали.
7. Исследование влияния скорости переплава на процессы рафинирования металла от вредных примесей и его структуру.
8. Изучение влияния режима охлаждения металла в кристаллизаторе на структуру, физические и механические свойства переплавленного металла.
9. Применение методов математического и физического моделирования переплавных процессов для совершенствования их технологии и оборудования.

При изучении процессов спецэлектрометаллургии выбор методики определяется задачами исследования. Изучая поведение компонентов металла при вакуумном переплаве, используют результаты анализа проб металла или контроля состава газовой фазы. Процессы испарения в вакууме исследуют по изменению состава конденсата. Взаимодействие в системе металл – шлак изучается приведением их в состояние равновесия или методом последовательного насыщения.

Контрольные вопросы

1. В каких агрегатах применяется продувка ванн кислородом?
2. Основные цели исследований кислородно-конвертерного процесса.
3. Как изучают структуру реакционной зоны, образующейся при продувке жидкого металла кислородом?
4. Основные направления исследований марганцовского процесса.
5. Какие методы контроля применяются в ходе промышленных экспериментов в марганцовском производстве?
6. Особенности проведения балансовых плавок в марганцовских печах.

7. Укажите основные направления исследований в области электросталеплавильного производства.

8. Основные цели теоретических исследований процессов электроплавки стали.

9. Опишите методы лабораторных исследований электросталеплавильных процессов.

10. Укажите назначение и виды процессов спецэлектрометаллургии.

11. Основные направления фундаментальных исследований в спецэлектрометаллургии.

12. Приведите главные направления прикладных исследований в области спецэлектрометаллургии.

Глава 10. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ, РАЗЛИВКИ И КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

§ I. Исследования в области ковшевой обработки стали

Внепечная обработка металла – неотъемлемая часть современной технологии, особенно при производстве стали в агрегатах большой единичной мощности с последующей разливкой на машинах непрерывного литья заготовок /МНЛЗ/. Выбор способа внепечной обработки металла и конструкции агрегата для его осуществления определяется марочным сортаментом выплавляемых сталей, уровнем заграт, требованиями к качеству готового проката, продолжительностью основного технологического цикла плавки и условиями разливки. Внепечная обработка металла в различных ковшах дает возможность решить такие задачи сталеплавильного производства, как удаление водорода до уровня нефлокеночувствительности; снижение содержания кислорода, азота и неметаллических включений; точное легирование с узкими пределами колебаний концентрации вводимых элементов; выравнивание температуры и состава металла во всем объеме ковша; глубокое обезуглероживание легированных расплавов; десульфурация, иногда дефосфорация.

Наиболее перспективными следует считать такие направления научных исследований в области внепечной обработки стали.

1. Разработка технологии комбинированной обработки стали в специальных агрегатах /АКОС/. В сталеразливочном ковше она включает в себя применение вакуума, восстановительных шлаков и инертного газа в сочетании с электроподогревом. Агрегаты АКОС позволяют вывести из дуговой сталеплавильной печи все операции по раскислению, десульфурации и доводке металла, что увеличит производительность действующих печей на 25–30% и одновременно значительно повысит качество стали.

2. Разработка технологии электровакуумного рафинирования стали. Использование этой технологии для коррозионностойкой и электротехнической стали показало, что вакуумирование сгруи с ее одновременным электроподогревом обеспечивает комплексное рафинирование металла от кислорода, газов, серы и неметаллических включений, а также снижение тепловых потерь при обработке до 20%.

3. Оптимизация технологии аргонокислородного рафинирования /АКР/. Это экономичный способ выплавки особоизкоуглеродистой коррозионно-стойкой стали в агрегате конвертерного типа, позволяющий использовать в составе металлической шихты до 100% хромистых отходов и более дешевые сорта углеродистого феррохрома и повышающий производительность дуговых печей на 30%.

4. Совершенствование технологии вакуумкислородного рафинирования /ВКР/ коррозионно-стойкой стали, позволяющей существенно снизить потери хрома и титана.

5. Разработка способа вакуумирования стали в потоке при непрерывной разливке. Он практически полностью исключает вторичное окисление и насыщение металла азотом из атмосферы, значительно снижает теплопотери при вакуумировании и расход ферросплавов и раскислителей.

6. Выбор эффективного способа перемешивания металла в ковше при внепечной обработке. Кроме электромагнитного перемешивания, перспективно пульсационное перемешивание металла инергным газом.

7. Совершенствование технологии вакуумирования стали в ковше. Особый интерес представляет исследование технологии аргоновакуумной порционной дегазации металла /АВДП-процесс/. Этот процесс дает возможность сократить продолжительность цикла вакуумирования почти в 2 раза, получить содержание водорода в металле не более $2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ независимо от уровня окисленности металла перед вакуумированием, заменить аргон на азот без повышения содержания последнего в готовом металле.

8. Совершенствование процесса рафинирования стали жидкими синтетическими шлаками. Эта технология позволяет стабильно получать конвертерную сталь с содержанием серы не более 0,006%. Использование комплекса шлакоплавильная печь – циклон должно снизить затраты на обработку синтетическим шлаком в 2 раза за счет применения дешевого сырья /пылевидных отходов при производстве алюминиевых сплавов/ и увеличения производительности агрегата в 1,5-2 раза. Перспективны работы по внепечному рафинированию сложнолегированных сталей в ковше силикокальцием, обработкой синтетическим шлаком и редкоземельными элементами.

9. Использование для внепечной десульфурации стали твердых шлакообразующих смесей на основе извести и плавикового шпата и продувки металла порошкообразным силикокальцием. В сочетании с основной футеровкой сталеразливочных ковшей эта технология обеспечивает получение содержания серы в низколегированной трубной стали менее 0,006%. При производстве рельсовой стали значительное повышение качества металла достигается при обработке твердым синтетическим шлаком, получаемым из отработанного шлака ЭШП и доломитизированной извести.

10. Совершенствование технологии продувки металла в ковше инертными газами. Продувка аргоном через погружные фурмы и пористые оgneупорные вставки стала практически обязательным элементом технологической схемы при выплавке стали в большегрузных сталеплавильных агрегатах, особенно при раскислении металла в ковше и разливке его на МНЛЗ. Ведется поиск оптимальных конструкций фурм для ввода газов, исследуется возможность замены аргона азотом. Установки для продувки стали аргоном в ковше оснащают системой бункеров для ферросплавов, дозирующими устройствами и аппаратами для ввода в металл алюминия, в результате чего создаются условия для коррекции химического состава, модификации и микролегирования стали. Установки доводки металла /УДМ/ дают возможность проводить комплексную обработку стали, что позволяет получать металл с низким содержанием вредных примесей и узкими пределами химического состава.

11. Улучшение качества оgneупоров для футеровки вакууматоров. Торкретирование футеровки вакууматора дает возможность повысить стойкость рабочих зон вакуумной камеры в 2-3 раза.

12. Разработка автомагнитированных систем контроля установок внепечного рафинирования стали с целью ускорить получение информации о параметрах металла, подвергаемого внепечной обработке.

В теоретических исследованиях на основе анализа термодинамических данных определяют оптимальные технологические условия процесса, обеспечивающие заданную степень рафинирования металла от примесей. Для анализа тепло- и массообменных процессов при ковшевой обработке стали используют математическое моделирование.

В лабораторных исследованиях применяют холодное и горячее моделирование. Холодное моделирование /на водяных моделях/ позволяет изучить гидродинамику перемешивания металла в ковше, характер дегазации металла и взаимодействия с дутьем. Для этого применяют различные индикаторы, подкрашивающие потоки жидкости, фото- и киносъемку. С помощью горячего моделирования исследуют процессы взаимо-

действия металла со шлаком, растворения шлакообразующих, рафинирующих и легирующих добавок. При этом могут изучаться физические свойства жидкого металла и шлака: вязкость, поверхностное натяжение, плотность. Для проведения таких исследований используется обычное лабораторное оборудование.

Процессы раскисления стали исследуют посредством анализа содержания кислорода в металле или его активности. Пробы на кислород отбирают с помощью кварцевых пробоотборников, погруженных непосредственно в ковш с расплавом. Активность кислорода в металле измеряют активометром. При исследовании кинетики вакуумного раскисления определяют количество и состав отходящих при вакуумировании газов. Газ на выходе из вакуумного насоса анализируют на масс-спектрометре. Температуру металла в опытах по вакуумированию измеряют обычно оптическим пирометром, предварительно отградуированным по термопаре погружения.

Основные методы, применяемые при исследовании внепечных способов обработки стали в промышленных условиях, аналогичны используемым при изучении сталеплавильных процессов. Они заключаются в контроле и наблюдении за процессом обработки, проведении балансовых плавок, статистической обработке данных текущего учета производства. При наблюдении за ходом процесса проводят его хронометраж, отбирают пробы металла и шлака, измеряют температуру газов. При исследовании процессов в вакууматоре используют пробоотборник, позволяющий периодически отбирать пробы металла и шлака в процессе вакуумирования без нарушения вакуума.

При проведении балансовых плавок учитывают все материалы, заливаемые в ковш, определяют их массу и состав, взвешивают полученные металл и шлак и определяют их состав. Балансовые плавки позволяют определить виды потерь металла и расходные коэффициенты процесса.

Статистическая обработка паспортных данных плавок обычно производится методом множественной корреляции, позволяющей определить долю влияния отдельных факторов на показатели исследуемого процесса.

§ 2. Исследование процессов разливки стали

Разливка стали – завершающий этап технологического процесса. В связи с этим технология разливки во многом определяет качество и выход годных слитков или непрерывно литых заготовок /НЛЗ/, выпускаемых цехом.

Основные цели исследований процессов разливки стали могут быть разделены на следующие группы.

1. Разработка новых эффективных способов разливки. К ним относятся непрерывная и полуnепрерывная разливка, разливка в вакууме, под шлаками, теплоизолирующими смесями и др.

2. Улучшение организации разливки. Обеспечивается главным образом внедрением нового оборудования и технологических приемов, например, заменой стопоров шиберными затворами, использованием набивной футеровки ковшей взамен кирпичной, основной – вместо шамотной и др.

3. Повышение пропускной способности разливочных участков. Обусловлено постоянно растущей производительностью сталеплавильных агрегатов. Достигается в основном в результате увеличения развеса слягков, площади сечения НЛЗ и повышения скоростей разливки стали.

4. Повышение выхода годного металла из слягка. Обеспечивается в результате совершенствования способов утепления головной части, применения новых способов утепления слягков спокойной стали, а также закупоривания и стабилизации окисленности слягков кипящей и полуспокойной стали. В наибольшей степени выход годного увеличивается при переходе на непрерывную разливку.

5. Совершенствование существующих и разработка новых типов МНЛЗ, конструкций их узлов и деталей, направленное на повышение производительности, качество поверхностных и внутренних слоев НЛЗ, а также организации непрерывной разливки.

6. Улучшение состояния поверхности слягков и заготовок. Достигается уменьшением или устранением таких поверхностных дефектов, как плены, трещины, завороги корки, пузыри. Для этого используют различные способы разливки под шлаками и защитными средами, совершенствуют температурный и скоростной режимы наполнения изложниц и кристаллизаторов, изменяют их конструкции, улучшают организацию струи стали, поступающей в изложницу или в кристаллизатор, изменяют технологию выплавки.

7. Получение слягков и НЛЗ с минимальной химической и структурной неоднородностью. С этой целью применяют различные внешние воздействия при разливке стали, изменяют конфигурацию слягка, совершенствуют технологию выплавки, раскисления и разливки металла.

8. Повышение механических и других служебных свойств стали. Основные методы – совершенствование технологии выплавки и раскисления стали, уменьшение содержания вредных примесей в ней, а также изменение химического состава и ее последующей термической обработки. Последние два метода больше относятся к областям металловедения и термообработки.

При изучении процессов разливки стали широко используют все основные виды исследований: теоретические, лабораторные, полупромышленные и промышленные.

Теоретические исследования направлены, главным образом, на создание математических и физико-химических моделей гидромеханических, тепло- и массообменных процессов при наполнение изложниц, кристаллизаторов и затвердевании слитка; они сводятся к расчетам по разработанным или уже известным моделям.

С помощью гидромеханических расчетов определяют скорости струи металла на выходе из стакана и входе в изложницу или кристаллизатор, потери напора в стаканах и литниковых каналах, скоростные поля жидкости в изложницах и кристаллизаторах. Данные о скоростных полях необходимы для вычисления теплоотдачи от жидкого металла к затвердевающей корке слитка.

Теплотехнические расчеты затвердевания слитков и НЛЗ необходимы для определения скоростей и времени их затвердевания при различных условиях охлаждения, установления режимов возникновения термических напряжений и некоторых дефектов.

При исследовании взаимодействия примесей в стали между собой и с окружающей атмосферой, образования неметаллических включений в слитке и НЛЗ прибегают к термодинамическому анализу физико-химических процессов, протекающих в жидкой стали при отливке и затвердевании слитка. Для таких расчетов используют общеизвестные положения химической термодинамики, термодинамики сплавов.

Расчеты кинетики реакций, протекающих при отливке и затвердевании слитка и НЛЗ, более сложны. Они выполняются, главным образом, чтобы выявить механизм образования химической неоднородности и разработки путей ее снижения. Для этих расчетов необходимо не только иметь представление о механизме процесса, но и владеть методами решений уравнений математической физики.

Широкое использование ЭВМ позволяет решать целый ряд сложных задач, связанных с процессами тепло- и массообмена в период отливки и затвердевания слитков, что дает возможность разрабатывать математические модели процессов с переменными теплофизическими свойствами веществ и сложными граничными условиями. Чем полнее данные о механизме исследуемых процессов, тем точнее получается модель, а ее решение - ближе к реальности, однако в этом случае усложняется разработка алгоритма решения модели.

При лабораторных исследованиях разливки стали применяются различные виды моделирования. Процессы, связанные

с перемещением жидкого металла, изучаются с помощью холодного /гидравлического/ моделирования. Последнее проводится при исследовании наполнения ковшей жидким металлом, влияния конструкций стаканов и затворов на характер истекающей струи, поведения струи жидкого металла, распределения потоков /скоростных полей/ в изложницах и кристаллизаторах. Гидравлическое моделирование всех этих процессов лучше всего проводить на специальной установке, содержащей модели ковша и изложницы или кристаллизатора /рис.10.1/. Чтобы уменьшить расход воды, установка должна иметь замкнутый цикл водоснабжения.

Материал модели выбирают исходя из изучаемых процессов. Для лучшего визуального наблюдения модели желательно делать полностью или частично из прозрачных материалов.

Исследование процессов наполнения ковшей сводится в основном к изучению скоростей перемешивания; определению эффективных коэффициентов диффузии, влияния перемешивания на скорости растворения различных присадок, вводимых в ковш. Скоростные поля жидкости в ковше можно измерять трубками Пито и различными трассерами. Скорости усреднения состава жидкости и растворе-

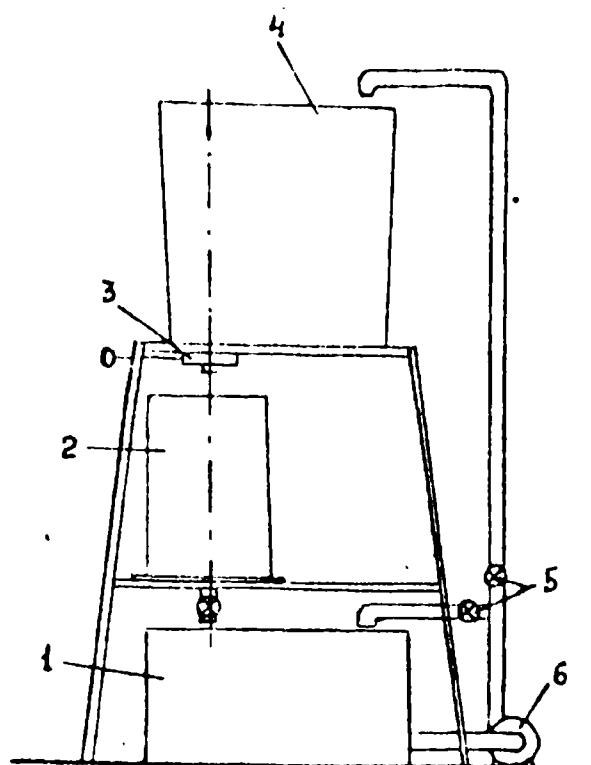


Рис.10.1. Установка для моделирования разливки: 1 - бак; 2 - модель изложницы или кристаллизатора; 3 - шарнирный затвор; 4 - модель ковша; 5 - вентили; 6 - насос

ния присадок целесообразно определять электрохимическими методами /см. гл.7, § 3/.

При изучении истечения жидкости через различные насадки /стаканы, затворы модели/ последние могут выполняться как из прозрачных, так и из непрозрачных материалов. При этом исследуется влияние конструкции и формы насадок на характер /организацию/ струи жидкости и скоростных полей в изложницах или кристаллизаторах. Основными методами фиксации характера струи является скоростная киносъемка и фотографирование с

очень короткими выдержками ($1/1000$ с и менее). Такое моделирование позволяет выбрать конструкцию насадки, обеспечивающую требуемый характер струи или циркуляции жидкости.

Изучение скоростных полей жидкости в изложницах и кристаллизаторах дает возможность установить характер циркуляции при их наполнении и места наибольшего теплового воздействия на кристаллизующуюся корку слитка, определить особенности заноса твердых или жидких частиц в глубь металла при разливке под шлаками или твердыми смесями. Модели для этого следует изготавливать с прозрачными стенками. Характер циркуляции лучше изучать с помощью трассеров, а скоростных полей — трубками Пиго.

Методами горячего моделирования /при температурах сталеплавильных процессов/ изучаются реакции взаимодействия составляющих жидкого металла между собой и с окружающей средой при разливке и затвердевании стали. При этом могут исследоваться физические свойства жидких металлов и шлаков /вязкость, поверхностное натяжение, плотность/, необходимые для выбора оптимального состава шлаковых смесей при разливке стали под ними.

Физико-химические взаимодействия жидкой стали с контактирующими средами /вторичное окисление, образование неметаллических включений, растворение примесей/ лучше исследовать в лабораторных условиях, так как при этом можно устраниТЬ или свести к минимуму побочные факторы, искажающие действительную картину процессов.

Изучение теплового взаимодействия стали с изложницами и кристаллизаторами в лабораторных условиях дает возможность более точно определить температурные поля в слитках, НЛЗ, кристаллизаторах и изложницах и их поведение при затвердевании стали. Однако размеры слитков ограничены вместимостью лабораторных плавильных печей, что затрудняет использование полученных результатов при изучении затвердевания реальных слитков.

На установках электрогидротепловой аналогии /см. гл. 7, § 4/ можно осуществлять математическое моделирование затвердевания слитков с некоторыми неизвестными граничными условиями /температура наружной поверхности слитка, ширина зазора между слитком и изложницей/. Последние затем определяются по результатам моделирования.

Промышленные и полупромышленные исследования проводят путем отливки отдельных слитков или целых плавок по опытной технологии. На основе полученных результатов изучают различные процессы, протекающие при отливке и затвердевании слитка. Это могут быть новые скоростные

и температурные режимы разливки, конструкции изложниц, узлов МНЛЗ и другого разливочного оборудования, способы утепления головной части слитка, защита поверхности металла различными шлакообразующими и утепляющими смесями, приемы закупоривания слитков полуспокойной и кипящей стали и др. Процессы, связанные с огливкой и затвердеванием слитка и НЛЗ, изучают для определения влияния новых элементов технологии.

При разливке в производственных условиях применяют следующие методы.

Хронометраж позволяет фиксировать время операций, связанных с разливкой. Для определения скорости наполнения отдельных частей изложницы на внутренней ее поверхности наносят метки или подвешивают маячки нужной длины из толстой проволоки, затем измеряют время перемещения уровня металла между метками или маячками.

Визуальные наблюдения используют для изучения характера струи и поведения металла в изложницах и кристаллизаторах в период их наполнения и затвердевания слитков. Отмеченные особенности фиксируют в рабочем журнале.

Фото- и киносъемка проводятся для установления организации струи, изучения процессов на струе и поведения металла в изложницах и кристаллизаторах. При фото- и киносъемке жидкой стали следует применять соответствующие светофильтры /обычно синие/. Для определения величин требуемых выдержки и диафрагмы необходимо сделать несколько пробных снимков.

Отбор проб металла выполняют для определения химического состава стали, содержания и состава неметаллических включений и газов в ковше, изложницах или кристаллизаторах. Пробы на химический состав металла извлекают ложками или пробницами. Для взятия проб на неметаллические включения и газы из ковшей, изложниц или кристаллизаторов следует использовать пробницы, закрытые деревянной или керамической пробкой. Небольшие пробы металла отбирают трубками из кварца или тугоплавкого стекла с помощью вакуум-отсоса, а также трубками с предварительно созданным в них вакуумом.

Температуры измеряются для изучения особенностей теплообменных процессов между металлом и окружающей средой и установления их влияния на строение слитка и возникновение различных его дефектов. При кратковременных измерениях температуры жидкого металла можно пользоваться обычными термопарами погружения, но при этом возникают трудности с попаданием в требуемую точку измерения. Для длительных измерений

температуры металла применяют термопары, заделанные в футеровку ковш, стеки изложницы или плавающие на поверхности металла. Плавающие термопары заделывают в блоки из огнеупорных материалов, обычно шамотных, и опускают на поверхность металла в изложницах или кристаллизаторах. В одном блоке может быть установлено несколько термопар на определенном расстоянии друг от друга.

Для измерений температуры в теле затвердевающего сликга используют стационарно установленные термопары, пропущенные через стенку изложницы. Значительные трудности возникают при измерении температур во внутренних объемах затвердевающей НЛЗ, так как она перемещается относительно кристаллизатора. Для этого блоки термопар вмораживают в корку в верхних горизонтах заготовки и они попадают внутрь при ее вытягивании. При длительных измерениях особые требования по стойкости предъявляют к материалу защитных чехлов. Сликги, в которые были заделаны термопары, дальнейшей переработке не подвергаются, а идут в стходы.

Температуры стенок изложниц и кристаллизаторов измеряют с помощью блоков термопар, вставляемых в соответствующие места стенок. Для регистрации температур используют переносные и самопищащие потенциометры. При быстро меняющихся температурных состояниях можно применять многошлейфные осциллографы, однако точность измерений при этом уменьшается.

Выливание жидкой сердцевины сликга дает возможность изучать кинетику затвердевания и образования поверхностных дефектов. Для выливания металла из сквозных изложниц через небольшой промежуток времени после конца наполнения /до 1 мин/ ее достаточно приподнять краном, в других случаях изложницу опрокидывают. Такие операции следует производить на специально подготовленном участке с ограждением.

Применение радиоактивных изотопов позволяет изучить кинетику затвердевания сликгов и процессов массопереноса в них. Чаще других с этой целью используют изотопы фосфора и серы. Для фиксации фронта затвердевания изотопы вводят в жидкую fazу затвердевающего сликга в требуемые моменты времени. Чтобы исследовать процессы массопереноса, изотопы вносят в определенные объемы жидкой сердцевины, а из соответствующих мест отбирают пробы металла на радиоактивность. После затвердевания сликга из него вырезают темплеты и с них снимают авгорадиограммы, которые исследуют. Для изучения кинетики кристаллизации в затвердевающие сликги и НЛЗ можно вводить около 0,1% массы жидкой с сердцевины серы в виде FeS . Положение фронта затвердевания определяют на серных отпечатках с поперечных или продольных темплетов.

При изучении отдельных процессов иногда возникает необходимость в получении специфической информации, для чего приходится разрабатывать новые или видоизменять существующие методы исследований. Так, в исследованиях разливки стали начинают использовать различные электронные системы, тензометрические датчики, проникающие излучения, ультразвук, сложные оптические системы, лазеры. Некоторые из них применяют пока еще только в лабораториях, но в перспективе они могут быть использованы и в производственных условиях.

§ 3. Исследование качества стальных слитков, НЛЗ и изделий из них

Стальные слитки и НЛЗ – конечная продукция сталеплавильных цехов, а их качество служит основным показателем результатов технологического процесса, в том числе оправдания и внедрения новой технологии или ее отдельных элементов. Во многих случаях сравнивают показатели качества изделий, полученных из слитков и НЛЗ /проката, поковок/. Качество стальных слитков, заготовок и изделий из них определяют по наличию поверхностных и внутренних дефектов, механическим и служебным свойствам металла, химической и структурной неоднородности, загрязненности неметаллическими включениями, коррозионной стойкости. При этом используют такие методы.

Осмотр поверхности – основной метод обнаружения поверхностных дефектов: трещин, рванин, плен, пузырей, крупных неметаллических включений, открытых усадочных пороков. Для нахождения и определения вида дефекта требуются известные навыки и опыт. При осмотре фиксируют внешний вид дефекта, его протяженность, расположение относительно границ слитка или изделия, площадь, пораженную дефектом, возможность его удаления. Для наглядности составляют эскизы внешнего вида и расположения дефекта или изготавливают фотографии.

Макроисследования металла. Сущность этого метода заключается в изучении подготовленных образцов или отпечатков с них невооруженным глазом либо при небольшом увеличении. Наиболее распространенные способы подготовки к макроисследованию – снятие серных отпечатков и гравление образцов для выявления их структуры. Из слитков или изделий вырезают плоские образцы – гиппеты, крупные слитки можно только разрезать по исследуемым плоскостям. Нужные поверхности шлифуют до полного устранения крупных неровностей и царапин. Для снятия серного отпечатка фотобумагу вымачивают в 5%-м растворе серной кислоты, а затем прикладывают к отшлифованной поверхности. После появления отпечатка достаточной интенсивности его промывают, закрепляют в обычном фотографи-

ческом фиксаже, опять промывают и просушивают. О распределении серы и внутренних дефектов судят по степени потемнения отпечатка в различных местах.

Кристаллическую структуру и некоторые внутренние дефекты выявляют в результате травления образцов. Реактив для травления подбирают в зависимости от марки стали и вида определяемой структуры. При исследовании готовых изделий /рельсы, лист/ или заготовок вырезают поперечные гемплеты через все их сечение. В слитках можно вырезать продольные и поперечные гемплеты из их отдельных участков.

Исследование химической неоднородности. О качественной картине химической неоднородности можно судить по различному потемнению серного отпечатка. Для количественной оценки проводят химический анализ проб металла из требуемых мест слитков, НЛЗ, изделий или гемплетов. Стружку для проб отбирают сверлением /рис.10.2/. Данные изменения химического состава по различным сечениям слитка представляют в виде таблиц, или графиков.

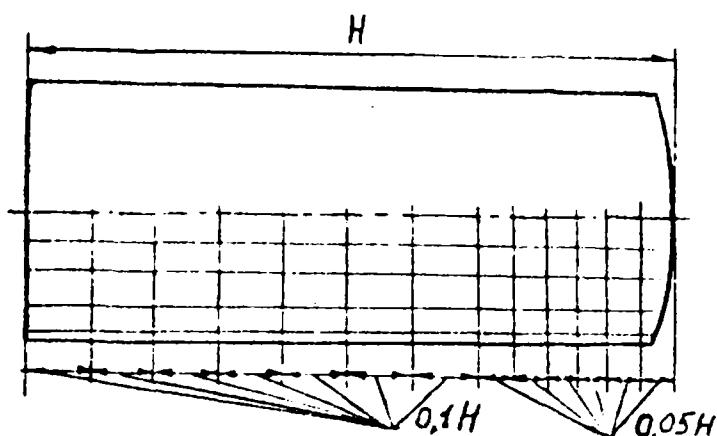


Рис.10.2. Расположение точек отбора проб на химическую неоднородность из гемплета слитка

Исследование неметаллических включений. Наиболее часто используют микроскопические и электролитические методы определения неметаллических включений. При микроскопических исследованиях из слитков, НЛЗ или изделий в требуемых местах вырезают образцы с линейными размерами 10...40 мм, одну из поверхностей которых полируют и рассматривают под металлографическим микроскопом. Тип и состав включений определяют по их виду, цвету, форме, при различном освещении. Для четкой идентификации включений требуется определенный опыт. Загрязненность стали включениями оценивают по стандартным шкалам, обычно пятибалльным. Этот метод главным образом качественного характера.

Для определения количества и химического состава включений используют электролитическое осаждение. Из слитков или изделий вырезают круглые образцы диаметром 10...15 мм и длиной 70...100 мм, которые помещают в коллоидные мешочки и электролитически растворяют. Полученный осадок подвергают качественному и количественному химическому анализу. Для проведения таких исследований необходимо специальное лабораторное оборудование.

В последние годы для исследования неметаллических включений используют микрозонды, основанные на отражении от образцов рентгеновского излучения. Наиболее известны приборы типа "Камека". Они позволяют изучать химические составы включений на площади диаметром 2...5 мкм.

Исследования микроструктуры проводят на небольших образцах /линейные размеры 10...50 мм/ для выявления особенностей кристаллической структуры слитков, НЛЗ и изделий в разных их частях. Для исследования одну из поверхностей образца полируют и обрабатывают различными травильными реактивами, а затем изучают под микроскопом. Обычно определяют величину первичного и вторичного зерен микроструктуры, наличие и характер отдельных структурных фаз, общую металлографическую структуру металла. При необходимости образцы предварительно подвергают термической или химико-термической обработке.

Определение механических и служебных свойств. Механические свойства изучают на образцах, вырезанных из определенных мест слитка и изделий. В зависимости от поставленной задачи образцы вырезают вдоль оси слитка либо поперек ее, вдоль направления прокатки либо поперек. В некоторых изделиях /лист, балки/ на одном участке вырезают образцы для целого комплекса исследований /рис.10.3/. Образцы, прошедшие механические испытания, могут дальше использоваться для микроисследований и определения неметаллических включений.

Образцы испытывают на разрыв, ударную вязкость и твердость. При испытании на разрыв определяют предел текучести, предел прочности, относительное сужение и удлинение. Форма и размеры образцов зависят от требований государственных стандартов и используемого оборудования. Испытанию на твердость могут подвергаться сами изделия. Специальные исследования проводятся при повышенных и пониженных температурах.

Служебные свойства стали исследуют путем так называемых технологических проб или технологических испытаний. К ним относятся испытания на загиб, перегиб, вытяжку при холодной штамповке, прочность сварного шва, коррозионную стойкость, электротехнические и др.

Для обнаружения внутренних дефектов изделий без нарушения их сплошности используют неразрушающие методы испытаний. Тонкостенные изделия просвечивают рентгеновским или гамма-излучением. Толстостенные изделия прозвучивают ультразвуком. Для обнаружения скрытых дефектов в ферромагнитных сталях и сплавах применяют различные виды магнитной дефектоскопии. Все эти исследования проводят на специальном оборудовании; при работе с проникающими излучениями необходимо соблюдать особые правила техники безопасности.

Контрольные вопросы

1. Укажите современные способы внепечной обработки стали.
2. Основные задачи исследований технологии продувки расплава инертным газом.
3. Сформулируйте цели исследований процесса обработки стали синтетическим шлаком и шлаковыми смесями.
4. Цели исследований внепечного вакуумирования стали.
5. Основные цели исследований разливки стали.
6. Какие вопросы решаются при теоретических исследованиях разливки стали?
7. Сущность использования методов холодного и горячего моделирования разливки стали.
8. Как проводятся промышленные исследования разливки стали?
9. Какие методы используются при промышленных исследованиях разливки стали?
10. Перечислите основные методы исследования качества слитков и НЛЗ.

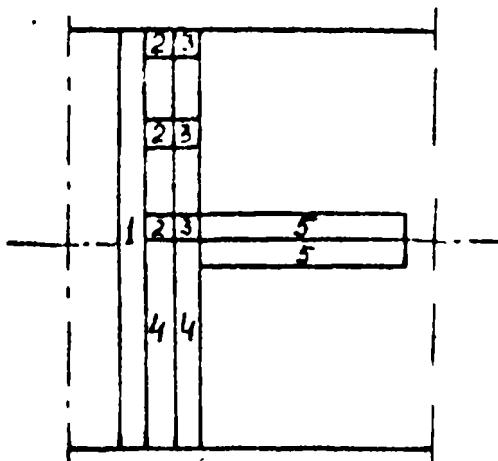


Рис.10.3. Схема вырезки образцов из листа, используемых для исследования: 1 - макроструктуры; 2 - микроструктуры, размера зерна, неметаллических включений; 3 - химического состава; 4 - механических свойств поперек прокатки; 5 - то же вдоль прокатки

Глава II. ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА В НАУЧНОМ КОЛЛЕКТИВЕ

§ I. Основные методы управления научным коллективом

Управление научно-технической деятельностью – это воздействие на научные организации и коллективы, на процесс исследований и разработок в целях повышения их эффективности. В зависимости от того, какими способами осуществляются функции управления в сфере научно-технической деятельности, различают программно-целевые, планово-координационные, хозрасчетные и научно-профессиональные методы управления.

Основой научных организаций являются первичные рабочие группы научных работников. Руководитель такой группы должен подбирать и распределить исполнителей по задачам, доводить задачи до исполнителей, организовывать взаимодействие внутри и вне коллектива, оказывать практическую помощь исполнителям, корректировать их действия и планы. Первостепенное значение для руководителя имеет умение выделить "научное качество" каждого сотрудника для оптимального распределения заданий и плодотворной организации внутригрупповой деятельности. Руководитель первичного научного коллектива, как правило, должен принимать на себя одну из трех творческих ролей: генератора идей, эрудита или критика в коллективном научном творчестве.

§ 2. Психологические аспекты взаимоотношений руководителя и подчиненного

Социально-психологический климат в научном коллективе оказывает существенное, а иногда и решающее влияние на совместную творческую деятельность. Он во многом определяется межличностными отношениями в группе, имеющими две стороны: деловую и эмоциональную.

Руководитель коллектива обязан организовать межличностные отношения в группе с целью их оптимизации. Его личность, поведение оказывают решающее влияние на морально-нравственный климат, поэтому желательно, чтобы он был и неформальным лидером в научном коллективе. Он концентрирует внимание сотрудников на необходимой работе, не навязывая собственного решения; создает атмосферу, благоприятствующую свободному высказыванию различных мнений; подыскивает и обобщает пуги достижения цели.

Поскольку творчество предполагает, кроме активности и инициативы, свободу духовного и практического самовыражения, то взаимоотношения между руководителем и подчиненным не могут носить приказного характера, поскольку нельзя творить по приказу. Руководитель должен довести

мысль о необходимости выполнения той или иной работы до исполнителя, убедить его, подсказать идею или направление поиска так, чтобы приказ исходил как бы от самого исполнителя. Здесь важную роль играет правильное осуществление принципа минимального контроля, права творческого работника на ошибку и критику. Морально-психологический климат первичной рабочей группы должен базироваться на демократизме, коллективизме, уважении к критике и самокритике независимо от служебного положения.

§ 3. Принципы организации научного труда

К важнейшим принципам организации труда относятся творческий подход, плановость, динамичность, коллективность.

Одличительная черта творческого труда - усиленная работа мысли, поскольку мышление - один из основных элементов научного труда. Поэтому при планировании определенной научной работы необходимо предусматривать время для обдумывания существа вопроса. Таким образом, научному работнику нужны способности не только к конкретной отрасли знания, но и к концентрации мысли. Необходимо подходить творчески к любой работе, в то же время концентрируя творческие усилия на главном - определении замысла основной идеи, разработке гипотез и пр. Чем больше творческой инициативы проявляет исследователь, тем больше успех в научном исследовании.

Плановость - исходный организационный принцип научного труда. Она воплощается в следующих формах: программах, предварительных и рабочих планах предстоящих исследований, индивидуальных планах и графиках научных работников.

Предварительная программа исследования состоит из задачи, содержания и народнохозяйственного значения, замысла, принципа решения, методики, объема работ и сроков выполнения.

Предварительный план ограничивает круг вопросов и работ, которые необходимо решить в процессе разработки конкретной темы.

Индивидуальный план, как правило, составляется на год. Его основная задача - установить перечень, содержание и трудоемкость работ и распределить их во времени, учитывая наиболее рациональную логическую последовательность их выполнения и необходимость синхронизации работы ее участников. При составлении индивидуального плана рекомендуется параллельно предусматривать обсуждение исследований, рецензирование, консультации и руководство работой вспомогательного персонала.

Контрольные вопросы

1. Основные принципы организации научного труда.
2. Как планируются научные исследования?
3. Преимущества коллективного труда перед индивидуальным.
4. Особенности делопроизводства при проведения научных исследований.
5. В чем заключается гигиена научного труда и отдыха?

Глава 12. ОФОРМЛЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР

§ 1. Отчет о НИР

Материалы исследований оформляют в виде отчета, который является официальным документом, отражающим объем выполненной работы и полученные данные. В отчете следует объективно отразить как положительные, так и отрицательные результаты, объяснить их с позиций теории, технологии, организации производства и т.п. Оформление результатов НИР в виде отчета служит одним из важнейших этапов, способствующих развитию навыков самостоятельной работы. Написание отчета должно быть предусмотрено техническим заданием, планом или программой выполнения работы.

Отчет о НИР должен быть оформлен по ГОСТ 7.32-81. В нем исчерпывающе, но лаконично излагают технико-экономическое обоснование проведенных исследований, методику их выполнения, приемы обработки полученных данных; описывают эксперименты и их результаты; обосновывают выводы и рекомендации; определяют изменения технологических режимов и оборудование, необходимое для их реализации; рассчитывают ожидаемый экономический эффект от внедрения в производство результатов исследований. В отчет о НИР необходимо включать титульный лист, список исполнителей, реферат, содержание, перечень условных обозначений, введение, основную часть, заключение, список использованных источников, приложение. Указанная структура является лишь общим планом, требующим дальнейшей детализации.

Реферат должен содержать: сведения об объеме отчета, количество иллюстраций, таблиц, использованных источников, перечень ключевых слов, текст реферата. Перечень ключевых слов дает представление о содержании отчета и включает от 5 до 16 слов, наиболее полно характеризующих его содержание, написанных в строчку в именительном падеже через запятые. В тексте реферата отражают: объект исследования, цель работы, методы исследования и аппаратуру, полученные результаты и их но-

визну, рекомендации по использованию результатов НИР, степень их внедрения и эффективность, область применения, основные конструктивные и технико-эксплуатационные характеристики. Оптимальный объем текста реферата 1200 знаков, но не более 2000 знаков.

Во введении необходимо кратко охарактеризовать состояние исследуемой темы, обосновать необходимость проведения исследований и оценить их эффективность в целом и для практической реализации в частности.

Основная часть отчета состоит из разделов, в которых обосновывают выбор направления работы, описывают теоретические и экспериментальные исследования, обобщают и оценивают полученные результаты.

В аналитическом обзоре рассматривают основные работы, проведенные ранее по аналогичной тематике, указывают на существующие расхождения во взглядах различных исследователей, недостатки методики и использованного оборудования. В этом разделе нужно показать, какие вопросы необходимо изучить и уточнить.

В разделе, в котором описывается методика проведения исследований, рассматривают применявшиеся в ходе экспериментов аппаратуру и методические приемы. Оригинальные лабораторные установки и оборудование для промышленных исследований нужно рассмотреть более подробно. Здесь же указывают способы обработки данных и обосновывают их выбор.

В разделе, посвященном экспериментальной части работы, описывают методику проведения исследования. Исходные данные и полученные результаты оформляют в виде таблиц и графиков. Особо следует выделить оригинальные, впервые полученные данные и наиболее полно их объяснить. В этом же разделе обобщают результаты, обсуждают их, сопоставляют с ранее известными и существующими гипотезами.

В заключение на материалах исследований делают выводы и дают рекомендации по их применению. Выводы следует формулировать четко, конкретно, не допуская двусмысленного толкования, с полным отражением основной сущности проведенной работы. В рекомендациях, в первую очередь, указывают предложения по внедрению полученных положительных результатов.

Список использованной литературы состоит из упоминаемых в отчете первоисточников и оформляется по ГОСТ 7.1-84.

В приложении помещают материалы, уточняющие или поясняющие отдельные положения экспериментальной части работы или выводов. Это могут быть таблицы градуировок, измерений, исходные данные опытов, некоторые проектные разработки, различные акты.

Отчет о работе содержит текстовой и иллюстративный материал. Текст печатают на машинке через 1,5 или 2 интервала на бумаге формата А4 с размерами поля по левому краю 300 мм, по правому - 10, сверху - 15, снизу - 20 мм. Первый экземпляр отчета должен быть отпечатан на белой бумаге четким шрифтом с минимальным количеством исправлений. Исправления, вставки в этот экземпляр делают черной гущью. Допускается отчет о НИР писать от руки. Нумерация страниц сквозная - от титульного листа до последней страницы, включая иллюстративный материал. Номер страницы проставляют арабскими цифрами в правом верхнем углу. На титульном листе номер страницы не ставят. Все экземпляры, кроме первого, переплетают.

При написании отчета необходимо следить за правильностью рубрикации. Разделы отчета нумеруются арабскими цифрами. В пределах каждого раздела выделяются подразделы, имеющие свою нумерацию, которая состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В подразделах могут выделяться пункты. Номер пункта состоит из трех чисел, разделенных точками. Первое число означает номер раздела, второе - подраздела, третье - пункта. Разделы и подразделы имеют названия, пункты - не имеют, текст в них следует за номером. Каждый раздел начинается с новой страницы. Названия разделов пишутся прописными буквами, названия подразделов - строчными.

Текст отчета должен быть написан логично, стилистически грамотно, с использованием единой общепринятой терминологии. При употреблении нестандартных терминов следует объяснить, что они означают. В тексте допускаются только общепринятые сокращения слов. Малоизвестные сокращения необходимо расшифровать при первом упоминании. В отчете могут применяться сокращенные названия марок изделий, материалов, машин. Физические величины следует приводить в СИ.

Для математических выкладок и формул рекомендуется использовать обозначения, установленные государственными стандартами или принятые в научно-технической литературе. Необходимо расшифровать все буквенные обозначения, входящие в формулу, и указать единицы величин. Все формулы нумеруются в пределах разделов. Номер проставляется у правого края листа и состоит из двух чисел - номера раздела и формулы, разделенных точкой.

Иллюстративный материал /графики, диаграммы, схемы, чертежи, фотографии натуральных образцов/ дополняет и поясняет текстовую часть. Иллюстрации выполняются по правилам Единой системы конструкторской документации /ЕСКД/ в виде фотографий или оттисков, воспроизведенных на

множительных аппаратах. В студенческих отчетах рисунки могут быть выполнены на кальке, миллиметровке, листах вагмана или на плотной бумаге соответствующего формата. Форма представления иллюстративного материала должна быть единообразной для всех разделов отчета. В первом экземпляре отчета, который направляется во ВНИЦ для снятия копий, рисунки выполняются на кальке или на плотной белой бумаге. Каждый рисунок должен иметь подпись, в которой кратко объясняется его суть и даются необходимые пояснения, расшифровывающие обозначения. При наличии нескольких кривых на графике желательно, чтобы каждая из них отличалась от остальных. Не рекомендуется на одном графике приводить более 5–6 кривых, перегружать графики надписями и обозначениями. Графики снабжаются координатной сеткой в соответствии с выбранным масштабом шкал, которая позволяет определить числовое значение приведенных величин. Все рисунки нумеруются в пределах главы. Если рисунков мало, допускается их сквозная нумерация в пределах всего отчета.

Отчет утверждает руководство организаций исполнителей и заказчика. Перед утверждением он обсуждается на научно-технических советах. Первый экземпляр отчета вместе с информационными картами высылается во ВНИЦ для снятия копии. Один или несколько экземпляров отчета остаются у исполнителя.

§ 2. Публикация научных материалов и заявки на изобретения

По результатам исследований публикуются монографии и статьи, делаются доклады на конференциях и совещаниях, в которых освещаются наиболее важные, новые, по мнению авторов, данные. В большинстве журналов, научно-технических сборниках объем статьи /доклада на конференцию/ не должен превышать 5–6 страниц машинописного текста. Количество рисунков ограничивают 3–4, что требует от авторов четкости и конкретности изложения материала. Обычно структура статьи предполагает постановку задачи, оценку ее актуальности, связанной с потребностями практики. Далее излагается методика исследований и обработка результатов. Следует указать точность получаемых данных и оценить погрешности методики. Основная часть статьи посвящается полученным результатам, их анализу. Результаты исследований обобщают и представляют в виде графиков и таблиц. Желательно, чтобы материал был наглядным. Здесь же приводятся сравнения с данными теоретического анализа, исследованиями других авторов. Особое внимание нужно обратить на корректность цитирования, избегать тенденциозности в подборе литературных источников. Желательно, чтобы

результаты эксперимента были описаны математическими или логическими соотношениями. Если математические модели получены методами математической статистики, необходимо изучить и отметить в статье вопросы адекватности моделей, область их применимости, коэффициенты корреляции и др.

На основании анализа результатов формулируют выводы и рекомендации, которыми и заканчивается статья. К статье прилагается список использованной литературы, оформленный в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-84. Вместе со статьей в редакцию направляют сопроводительные документы: выписку из протокола заседания научно-технического совета или кафедры, акт экспертизы, сведения об авторах и др. Вопрос о целесообразности публикации статьи решает редакция.

По согласованию с авторами отдельные рукописи могут быть депонированы. В этом случае в журнале печатается только краткий реферат. По запросам организаций или отдельных лиц редакция высылает копии депонированных рукописей.

В ходе исследований часто появляются новые научные и технические решения, реализация которых может привести к созданию изобретений. Изобретением считается новое и обладающее существенными отличиями техническое решение задачи в любой области народного хозяйства, социально-культурного строительства или обороны страны, дающее положительный эффект. В качестве объекта изобретения может быть устройство, способ, вещество или изобретение "на применение", предполагающее использовать известный объект в новых условиях или применить по новому назначению. В теории патентоведения каждый из перечисленных объектов имеет четко определенные признаки.

Все организационные стороны изобретательской деятельности регламентированы законодательными актами и юридическими документами. Во всех крупных исследовательских учреждениях, на предприятиях имеются патентно-лицензионные службы, одной из задач которых является осуществление организационно-методического руководства изобретательской деятельности и, в частности, помочь изобретателям в правильном оформлении материалов заявок на предполагаемые изобретения. Однако суть изобретения может быть разработана только специалистом.

Одним из основных признаков изобретения является новизна. Новизна предполагаемого изобретения первоначально оценивается авторами путем анализа патентной и технической литературы. Новым признается решение в том случае, если до поступления заявки сущность его не была раскрыта в СССР или за границей для неопределенного круга лиц настолько, что

стало возможным его осуществление. Это накладывает ограничения на публикацию материалов, связанных с предполагаемым изобретением. Изобретение должно обладать существенными отличиями от технических решений, имеющихся в науке и технике к моменту подачи заявки /на дату приоритета/. Существенные отличия характеризуются новой совокупностью признаков, которая обеспечивает положительный эффект, являющийся целью изобретения.

Лишь небольшая доля изобретений, так называемые "пионерские", не имеют прототипа. Основная же масса изобретений является усовершенствованием имеющихся технических решений. Поэтому предполагаемое изобретение сравнивают с прототипом и аналогом. Аналог – объект того же назначения, что и заявляемый, сходный с ним по технической сущности и достижаемому результату. Прототип – это наиболее близкий к изобретению по технической сущности и достижаемому результату аналог. Прототип выбирается из ряда аналогов по максимальному количеству существенных сходных признаков с предполагаемым изобретением.

Разработка изобретения завершается подачей заявки на выдачу авторского свидетельства. Заявка представляет собой совокупность документов, и включает: заявление о выдаче авторского свидетельства или патента, описание изобретения с формулой изобретения, акт испытаний, чертежи, схемы и другие материалы, необходимые для полного раскрытия сущности изобретения, справку о творческом участии каждого из соавторов, реферат. Научно-техническая экспертиза изобретений проводится Всесоюзным научно-исследовательским институтом государственной патентной экспертизы /ВНИИПЭ/. По результатам экспертизы делается заключение о целесообразности выдачи авторского свидетельства по заявке, о чем сообщается авторам.

§ 3. Приемка и внедрение результатов НИР

Приемка и передача для внедрения законченных НИР – завершающий этап, на котором решается вопрос об использовании научных разработок в сфере материального производства. Курс на ускорение НТИ определяет этот этап как важнейший.

Возможные формы завершения НИР регламентированы государственным стандартом:

разработка научных основ, новых методов и принципов исследования, научных данных о новых процессах и явлениях, их качественных и количественных характеристиках;

разработка новых стандартов, норм, методик, инструкций и других руководящих материалов;

разработка новых технологических процессов, режимов, составление технических заданий;

создание лабораторных и опытных образцов, получение новых продуктов и их испытание;

получение других положительных результатов.

При приемке и передаче для внедрения законченных НИР определяют:

степень достижения результатов, намеченных планом и рабочей программой;

качество выполненной работы и ее научно-технический уровень;

возможность использования результатов на производстве, характер, форму и объем их внедрения;

целесообразность использования средств и необходимость корректировки рабочих программ, сроков /возможно и решение о прекращении исследований/.

Ускорение темпов НТП и повышение на этой основе эффективности общественного производства в большой степени зависит от внедрения в промышленность научных разработок высокого технического уровня. Возможны различные формы внедрения результатов НИР, которые отличаются как полнотой и объемом внедрения, так и получаемым результатом. Например, при совершенствовании технологии процесса внедрение может заключаться в дополнении или изменении технологических инструкций, технических условий. Эти изменения согласуются с головными институтами и вводятся предприятием.

Если в результате проведенных опытно-промышленных работ внедряется новый вид сырья, внедрение может быть оформлено изменением межотраслевых и внутризаводских технических условий.

При освоении производства чугуна, стали и ферросплавов новых марок внедрение результатов НИР в промышленность оформляется составлением и последующим утверждением сначала технических условий, а затем – и общесоюзного стандарта на новые виды продукции.

Результатом НИР может быть технологический процесс, для которого необходимо создать оборудование /механическое, электрическое и т.д./, что связано с реконструкцией или со строительством новых участков, цехов или их отделений. В этом случае одной из форм внедрения НИР является выдача и утверждение технического задания на проектирование цеха /отделения/, его строительство и освоение нового технологического процесса.

Внедрение завершается отчетом о проведенных испытаниях нового промышленного оборудования в процессе его эксплуатации и технологии производства, выполняемой по государственным стандартам и нормативным документам. В нем рассчитывается технико-экономическая эффективность внедренных результатов.

Большое народнохозяйственное значение имеет внедрение новой техники и технологии, к которой относятся впервые реализуемые новые технологические процессы, основанные на изобретениях, а также способы организации производства, обеспечивающие повышение технико-экономических показателей производства или решение социальных и других задач развития народного хозяйства.

Решение о целесообразности создания и внедрения новой технологии принимается на основании рассчитанного годового экономического эффекта, представляющего собой суммарную экономию всех производственных ресурсов /живого труда, материалов, капитальных вложений/, которую получит народное хозяйство в результате использования и производства новой техники, что, в конечном счете, выражается в увеличении национального дохода.

Методика /основные положения/ определения экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений единица и обязательна для всех отраслей народного хозяйства.

Годовой экономический эффект от применения новых технологических процессов, механизации и автоматизации производства, способов организации производства и труда, обеспечивающих экономию производственных процессов при выпуске одной и той же продукции, руб.:

$$\mathcal{E} = (\mathcal{Z}_1 - \mathcal{Z}_2) A, \quad /12.1/$$

где \mathcal{Z}_1 , \mathcal{Z}_2 - приведенные затраты единиц продукции /работы/, производимой с помощью базовой и новой техники, руб.; A - годовой объем производства продукции /работы/ с помощью новой техники в расчетном году, натур.ед.

Приведенные затраты

$$\mathcal{Z} = C + E_n K, \quad /12.2/$$

где C - себестоимость единицы продукции /работы/, руб.; $E_n = 0,15$ - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; K - удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб.

Годовой экономический эффект от производства и использования новых или усовершенствованных предметов труда /материалов, сырья, топлива/, а также средств труда со сроком службы менее одного года

$$\mathcal{E} = \frac{y_1 z_3}{y_2} + \frac{(H_1 - H_2) - E_H (K_2 - K_1)}{y_2} - z_4 A_2, \quad /12.3/$$

где \mathcal{E}_3 , \mathcal{E}_4 - приведенные затраты единицы соответственно базового и нового предмета труда, руб.; y_1 , y_2 - удельные расходы соответственно базового и нового предмета труда в расчете на единицу продукции /работы/, выпускаемой производителем, натур.ед.; H_1 , H_2 - затраты на единицу продукции /работы/ при использовании базового и нового предмета труда без учета их стоимости, руб.; K_1 , K_2 - сопутствующие капитальные вложения при использовании базового и нового предмета труда в расчете на единицу продукции /работы/, производимой с применением нового предмета труда, руб.; A_2 - годовой объем производства нового предмета труда в расчетном году, натур.ед.

При расчете годового экономического эффекта от внедрения в производство новой продукции или продукции повышенного качества /с более высокой ценой/, а также этих видов продукции, выпускаемых с использованием результатов изобретений и рационализаторских предложений, необходимо пользоваться формулой

$$\mathcal{E} = (\Pi - E_H K_3) A_2, \quad /12.4/$$

где Π - прибыль от реализации новой продукции или рост прибыли ($\Pi_2 - \Pi_1$) от реализации продукции повышенного качества, руб.; Π_2 , Π_1 - прибыль от реализации продукции соответственно повышенного и прежнего качества, руб.; K_3 - удельные капитальные вложения на производство новой продукции или удельные дополнительные капитальные вложения, связанные с повышением качества продукции, руб.

В методике определения экономической эффективности приводятся и другие примеры расчета годового экономического эффекта, получаемого при внедрении различных вариантов результатов научных исследований, которые позволяют еще в ходе исследований определить лучший вариант новой технологии, продукции или оптимальные параметры использования нового вида сырья, топлива, материалов и т.д. Очевидно, что расчеты технико-экономической эффективности внедрения новой техники по единой методике должны широко использоваться в ходе исследований и при внедрении их результатов.

Контрольные вопросы

1. Структура отчета о НИР и содержание его основных разделов.
2. Какие требования предъявляются к оформлению отчета о НИР?
3. Как подготовить публикацию по материалам НИР?
4. Что называется изобретением? Его основные признаки.
5. По каким показателям оценивают законченные НИР?
6. Формы внедрения результатов НИР и оценка экономической эффективности внедрения.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Значение функции $\Phi(x) =$ 30^{*}

229

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	0,50	0,3829	1,00	0,6827
0,05	0399	0,55	4177	1,05	7063
0,10	0797	0,60	4515	1,10	7287
0,15	1192	0,65	4843	1,15	7499
0,20	1585	0,70	5161	1,20	7699
0,25	1974	0,75	5467	1,25	7887
0,30	2358	0,80	5763	1,30	8064
0,35	2737	0,85	6047	1,35	8230
0,40	3108	0,90	6319	1,40	8385
0,45	3473	0,95	6579	1,45	8529

Приложение I
Таблица П.И.1.

$$= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-x^2/2) dx$$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1,50	0,8664	2,1	0,9643	3,1	0,9981
1,55	8789	2,2	9722	3,2	9985
1,60	8904	2,3	9786	3,3	9990
1,65	9011	2,4	9836	3,4	9993
1,70	9109	2,5	9876	3,5	9995
1,75	9199	2,6	9907	4,0	9999
1,80	9281	2,7	9931	5,0	9999
1,85	9357	2,8	9949		
1,90	9426	2,9	9963		
1,95	9488	3,0	9973		

Значение функции $f(x) =$

x	(x)	x	(x)
0,0	0,3989	1,1	0,2179
0,1	3970	1,2	1942
0,2	3910	1,3	1714
0,3	3814	1,4	1497
0,4	3683	1,5	1295
0,5	3521	1,6	1109
0,6	3332	1,7	0,0940
0,7	3123	1,8	0790
0,8	2897	1,9	0656
0,9	2661	2,0	0540
1,0	2420	2,1	0440

Таблица II.1.2

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2)$$

x	(x)	x	(x)
2,2	0,0355	3,3	0,0017
2,3	0283	3,4	0,0012
2,4	0224	3,5	0,0009
2,5	0175	3,6	0,0006
2,6	0136	3,7	0,0004
2,7	0104	3,8	0,0003
2,8	0,0079	3,9	0,0002
2,9	0060	4,0	0,0001
3,0	0044	4,5	0,00002
3,1	0033	5,0	0,000002
3,2	0024		

Таблица П.1.3

Значения χ^2 -критерия

Число степеней свободы v	Уровень значимости α			
	0,50	0,10	0,05	0,01
1	0,455	2,71	3,84	6,64
2	1,39	4,61	5,99	9,21
3	2,37	6,25	4,81	11,3
4	3,36	7,78	9,49	13,3
5	4,35	9,24	11,1	15,1
6	5,35	10,6	12,6	16,8
7	6,35	12,0	14,1	18,5
8	7,34	13,4	15,5	20,1
9	8,34	14,7	16,9	21,7
10	9,34	16,0	18,3	23,2
11	10,3	17,3	19,7	24,7
12	11,3	18,5	21,0	26,2
13	12,3	19,8	22,4	27,7
14	13,3	21,1	23,7	29,1
15	14,3	22,3	25,0	30,6
16	15,3	23,5	26,3	32,0
17	16,3	24,8	27,6	33,4
18	17,3	26,0	28,9	34,8
19	18,3	27,2	30,1	36,2
20	19,3	28,4	31,4	37,6

Таблица П.1.4

Значения вероятностей разности по t -критерию

Значение t	$n - 1$										
	1	2	3	4	5	6-7	8-10	11-15	16-24	25	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0,0	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
0,1	532	535	537	537	539	539	539	539	539	539	539
0,2	563	570	573	574	576	576	578	578	578	578	578
0,3	593	606	608	610	612	613	615	616	616	616	616
0,4	621	636	642	645	647	649	651	652	653	654	
0,5	648	667	674	678	681	683	685	687	689	689	

Окончание табл.П.1.4

1	:	2	:	3	:	4	:	5	:	6	:	7	:	8	:	9	:	10	:	11
0,6		672		695		705		710		713		715		718		721		722		724
0,7		694		723		733		739		742		746		749		752		754		756
0,8		715		746		759		766		770		774		778		781		783		785
0,9		733		768		783		790		795		800		804		808		811		813
1,0		750		789		804		813		818		823		828		832		835		838
1,1		765		807		824		834		839		844		850		854		858		860
1,2		779		824		842		852		858		864		870		874		878		881
1,3		791		838		858		868		875		881		887		892		896		889
1,4		803		852		872		883		890		896		902		907		912		915
1,5		813		864		885		896		903		909		916		921		925		928
1,6		822		875		896		908		915		921		928		933		937		940
1,7		831		884		906		918		925		932		938		943		948		951
1,8		839		893		915		927		934		941		947		952		956		959
1,9		846		901		923		935		942		948		955		960		964		967
2,0		852		908		930		942		949		955		962		967		970		973
2,1		858		915		937		948		955		961		967		972		976		978
2,2		864		921		942		954		960		966		972		977		980		982
2,3		870		926		948		958		965		971		977		981		984		986
2,4		874		931		952		963		969		975		980		984		987		989
2,5		879		935		956		966		973		978		983		987		989		991
2,6		883		939		960		970		976		981		986		989		991		993
2,7		887		943		963		973		979		983		988		991		993		995
2,8		891		946		966		976		981		985		990		993		995		996
2,9		894		949		969		978		983		987		991		994		996		997
3,0		898		952		971		980		985		989		993		995		997		997
3,2		904		957		975		984		988		991		995		997		998		998
3,4		909		962		979		986		990		993		996		998		998		999
3,6		914		965		982		989		992		994		997		998		-		-
3,8		918		969		984		990		994		996		998		999		-		-
4,0		922		971		986		992		995		997		998		-		-		-
4,2		926		974		988		993		996		998		999		-		-		-
4,4		929		976		989		994		996		998		-		-		-		-
4,6		932		978		990		995		997		998		-		-		-		-
4,8		935		980		991		996		998		999		-		-		-		-
5,0		937		981		992		996		998		999		-		-		-		-
5,2		940		982		993		997		998		-		-		-		-		-
5,4		942		984		994		997		998		-		-		-		-		-

Таблица П.1.5

Критерии Стьюденга / $\alpha = 0,01 \dots 0,1$ /

<i>N</i>	0,01	0,02	0,05	0,10
1	63,657	31,821	12,706	6,314
2	9,925	6,965	4,303	2,920
3	5,841	4,541	3,182	2,353
4	4,604	3,747	2,776	2,132
5	4,032	3,365	2,571	2,015
6	3,707	3,143	2,447	1,943
8	3,355	2,896	2,306	1,860
10	3,169	2,764	2,228	1,812
15	2,947	2,602	2,131	1,753
20	2,845	2,528	2,086	1,725
30	2,750	2,457	2,042	1,697
60	2,660	2,390	2,000	1,671
120	2,617	2,358	1,980	1,658
	2,576	2,326	1,960	1,645

Таблица II.1.6

Критерий Фишера / $\alpha = 0,05/$

f_{on}	f_{ag}											
	1	2	3	4	5	6	10	20	50	100	∞	
1	161	200	216	225	230	234	242	248	252	253	254	
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,39	19,44	19,47	19,49	19,50	
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,78	8,66	8,58	8,56	8,53	
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	5,96	5,80	5,70	5,66	5,63	
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,74	4,56	4,44	4,40	4,36	
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,06	3,87	3,75	3,71	3,67	
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,34	3,15	3,03	2,98	2,93	
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	2,97	2,77	2,64	2,59	2,54	
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,55	2,33	2,18	2,12	2,07	
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,35	2,18	1,96	1,90	1,84	
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,07	1,84	1,66	1,59	1,51	
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,30	2,19	1,92	1,68	1,48	1,39	1,28	
200	3,89	3,04	2,65	2,41	2,26	2,14	1,87	1,62	1,42	1,32	1,19	
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	1,83	1,57	1,35	1,24	1,00	

Критерий Кохрена $\lambda \alpha =$

n	$\lambda \alpha$					
	1	2	3	4	5	6
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,8534
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065	0,4783
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307	0,3974	0,3726
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823
12	0,5410	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602
24	0,3434	0,2354	0,1907	0,1656	0,1493	0,1374
30	0,2929	0,1980	0,1593	0,1377	0,1237	0,1137
40	0,2370	0,1576	0,1259	0,1082	0,0968	0,0887
60	0,1737	0,1131	0,0895	0,0765	0,0682	0,0623
120	0,0998	0,0632	0,0495	0,0419	0,0371	0,0337
∞	0	0	0	0	0	0

235

Таблица II.1.7

0,05/

8	10	16	36	144	∞
0,8159	0,7880	0,7341	0,6602	0,5813	0,5000
0,6333	0,6025	0,5466	0,4648	0,4031	0,3333
0,5175	0,4884	0,4366	0,3720	0,3093	0,2500
0,4387	0,4118	0,3645	0,3066	0,2513	0,2000
0,3817	0,3568	0,3135	0,2612	0,2119	0,1667
0,3384	0,3154	0,2756	0,2278	0,1833	0,1429
0,3043	0,2829	0,2462	0,2022	0,1616	0,1250
0,2768	0,2568	0,2226	0,1820	0,1446	0,1111
0,2541	0,2353	0,2032	0,1655	0,1308	0,1000
0,2187	0,2020	0,1737	0,1403	0,1100	0,0833
0,1815	0,1671	0,1429	0,1144	0,0889	0,0667
0,1422	0,1303	0,1108	0,0879	0,0675	0,0500
0,1216	0,1113	0,0942	0,0743	0,0567	0,0417
0,1002	0,0921	0,0771	0,0604	0,0457	0,0333
0,0780	0,0713	0,0595	0,0462	0,0347	0,0250
0,0552	0,0497	0,0411	0,0316	0,0234	0,0167
0,0292	0,0266	0,0218	0,0165	0,0120	0,0083
0	0	0	0	0	0

Таблица П.1.8

Структура композиционных планов
для полиномиальных моделей второй степени

Название плана	Тип ядра плана	Число факторов	Число опытов				Величина звездного плеча
			в ядре плана	в звездных точках	на нулевом уровне	общее	
Ортогональный	2^2	2	4	4	1	9	1,000
	2^3	3	8	6	1	15	1,215
	2^4	4	16	8	1	25	1,414
	2^{5-1}	5	16	10	1	27	1,547
	2^{6-1}	6	32	12	1	45	1,724
Ротогабельный	2^2	2	4	4	5	13	1,414
	2^3	3	8	6	6	20	1,682
	2^4	4	16	8	7	31	2,000
	2^{5-1}	5	16	10	6	32	2,000
	2^{6-1}	6	32	12	9	53	2,378

Таблица П.1.9

Матрица симплексно-решетчатого планирования
для построения кубических моделей

Параметр опыта	Номер опыта	Индексация отклика	Содержание компонентов, доли ед.				
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
	1	3	4	5	6	7	8
С монокомпонентами	1	y_1	1	0	0	0	0
	2	y_2	0	1	0	0	0
	3	y_3	0	0	1	0	0
	4	y_4	0	0	0	1	0
	5	y_5	0	0	0	0	1
С бинарными смесями компонентов	6	y_{112}	2/3	1/3	0	0	0
	7	y_{122}	1/3	2/3	0	0	0
	8	y_{113}	2/3	0	1/3	0	0
	9	y_{133}	1/3	0	2/3	0	0
	10	y_{223}	0	2/3	1/3	0	0
	11	y_{233}	0	1/3	2/3	0	0

Окончание табл.П.1.9

I	:	2	:	3	:	4	:	5	:	6	:	7	:	8
С бинарными смесями компонентов	I2	y_{224}		0		2/3		0		1/3		0		
	I3	y_{244}		0		1/3		0		2/3		0		
	I4	y_{334}		0		0		2/3		1/3		0		
	I5	y_{344}		0		0		1/3		2/3		0		
	I6	y_{114}		2/3		0		0		1/3		0		
	I7	y_{144}		1/3		0		0		2/3		0		
	I8	y_{115}		2/3		0		0		0		1/3		
	I9	y_{155}		1/3		0		0		0		2/3		
	I20	y_{225}		0		2/3		0		0		1/3		
	I21	y_{255}		0		1/3		0		0		2/3		
С тройными смесями	I22	y_{335}		0		0		2/3		0		1/3		
	I23	y_{355}		0		0		1/3		0		2/3		
	I24	y_{445}		0		0		0		2/3		1/3		
	I25	y_{455}		0		0		0		1/3		2/3		
	I26	γ_{123}		1/3		1/3		1/3		0		0		
	I27	y_{134}		1/3		0		1/3		1/3		0		
	I28	y_{234}		0		1/3		1/3		1/3		0		
	I29	y_{124}		1/3		1/3		0		1/3		0		
	I30	y_{125}		1/3		1/3		0		0		1/3		
	I31	y_{135}		1/3		0		1/3		0		1/3		
	I32	y_{145}		1/3		0		0		1/3		1/3		
	I33	y_{235}		0		1/3		1/3		0		1/3		
	I34	y_{245}		0		1/3		0		1/3		1/3		
	I35	y_{345}		0		0		1/3		1/3		1/3		

Таблица П.1.10

План-матрица комплексно-решетчатого планирования
для построения линейных /опыты № 1-5/, квадратных
/опыты № 1-5; 6-15/ и специальных кубических /опы-
ты № 1-25/ математических моделей

Параметр опыта	Номер опыта	Индексация отклика	Содержание компонентов, доли ед.				
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
С монокомпо-нентами	1	y_1	1	0	0	0	0
	2	y_2	0	1	0	0	0
	3	y_3	0	0	1	0	0
	4	y_4	0	0	0	1	0
	5	y_5	0	0	0	0	1
С бинарными смесями компо-нентов	6	y_{12}	1/2	1/2	0	0	0
	7	y_{13}	1/2	0	1/2	0	0
	8	y_{23}	0	1/2	1/2	0	0
	9	y_{14}	1/2	0	0	1/2	0
	10	y_{24}	0	1/2	0	1/2	0
	11	y_{34}	0	0	1/2	1/2	0
	12	y_{15}	1/2	0	0	0	1/2
	13	y_{25}	0	1/2	0	0	1/2
	14	y_{35}	0	0	1/2	0	1/2
	15	y_{45}	0	0	0	1/2	1/2
С тройными смесями компо-нентов	16	y_{123}	1/3	1/3	1/3	0	0
	17	y_{134}	1/3	0	1/3	1/3	0
	18	y_{234}	0	1/3	1/3	1/3	0
	19	y_{124}	1/3	1/3	0	1/3	0
	20	y_{125}	1/3	1/3	0	0	1/3
	21	y_{135}	1/3	0	1/3	0	1/3
	22	y_{145}	1/3	0	0	1/3	1/3
	23	y_{235}	0	1/3	1/3	0	1/3
	24	y_{245}	0	1/3	0	1/3	1/3
	25	y_{345}	0	0	1/3	1/3	1/3

Приложение 2

Матрицы для поиска оптимума методом симплексного планирования

1. Для $K = 2$		Номер опыта		X_1	X_2
		1	-I	-I	
		2	+I	-I	
		3	0	0,73	

2. Для $K = 3$		Номер опыта		X_1	X_2	X_3
		1	-I	-I	+I	
		2	+I	-I	-I	
		3	-I	+I	-I	
		4	+I	-I	+I	

3. Для $K = 4$

Номер опыта		X_1	X_2	X_3	X_4	Номер опыта		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	-I	+I	+I	+I		1	-I	+I	+I	+I	+I	
2	+I	-I	+I	+I		2	+I	-I	+I	+I	+I	
3	+I	+I	-I	+I		3	+I	+I	-I	+I	+I	
4	+I	+I	+I	-I		4	+I	+I	+I	-I	+I	
5	-0,8I8	-0,8I8	-0,8I8	-0,8I8		5	+I	+I	+I	+I	-I	
						6	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38	

5. Для $K = 6$ Номер опыта

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	-I	+I	+I	+I	+I	+I
2	+I	-I	+I	+I	+I	+I
3	+I	+I	-I	+I	+I	+I
4	+I	+I	+I	-I	+I	+I
5	+I	+I	+I	+I	-I	+I
6	+I	+I	+I	+I	+I	-I
7	-0,2I5	-0,2I5	-0,2I5	-0,2I5	-0,2I5	-0,2I5

6. Для $K = 7$

Номер опыта		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
1	-I	-I	-I	+I	+I	+I	+I	
2	+I	-I	-I	-I	-I	+I	+I	
3	-I	+I	-I	-I	+I	-I	+I	
4	+I	+I	-I	+I	-I	-I	-I	
5	-I	-I	+I	+I	-I	-I	+I	
6	+I	-I	+I	-I	+I	-I	-I	
7	-I	+I	+I	-I	-I	+I	-I	
8	+I	+I	+I	+I	+I	+I	+I	

СПИСОК РЕКОМЕНДУМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. - М.: Металлургия, 1969. - 158 с.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 280 с.
3. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охогский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. - К.; Донецк: Выща шк., 1985. - 342 с.
4. Бронштейн И.Н., Семенджев К.А. Справочник по математике. - М.: Наука, 1981. - 718 с.
5. Вегман Б.Ф. Справочник доменщика. - М.: Металлургия, 1981. - 128 с.
6. Гасик М.И., Былин Б.И. Электрометаллургия ферросплавов: Учебник для вузов. - К.; Донецк: Выща шк., 1983. - 376 с.
7. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахан А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. - М.: Металлургия, 1979. - 256 с.
8. Дьяконов В.Л. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. - М.: Наука, 1986. - 220 с.
9. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. - К.: Выща шк., 1981. - 496 с.
10. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. - М.: Металлургия, 1976. - 552 с.
11. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента. - К.: Выща шк., 1982. - 120 с.
12. Линчевский Б.В. Техника металлургического эксперимента. - М.: Металлургия, 1979. - 256 с.
13. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. - М.: Высш.шк., 1982. - 224 с.
14. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. - М.: Металлургия, 1984. - 119 с.
15. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. - К.; Донецк: Выща шк., 1985. - 384 с.
16. Металлургия стали: Учебник для вузов / В.И.Явойский, Ю.В.Кряковский, В.П.Григорьев и др. - М.: Металлургия, 1983. - 584 с.
17. Основы научных исследований в черной металлургии / Под общ. ред. Ю.Н.Яковлева. - К.; Донецк: Выща шк., 1985. - 205 с.

18. Планирование новой техники: Справочник / Под ред. В.П.Александровой. - К.: Техника, 1982. - 182 с.
19. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Рысс М.А. Электрометаллургия стали и ферросплавов. - М.: Металлургия, 1984. - 568 с.
20. Прахов Б.Г. Изобретательство и патентование: Словарь-справочник. - К.: Выща школа, 1987. - 181 с.
21. Проблемы руководства научным коллективом / Под ред. М.Г.Ярошевского. - М.: Наука, 1982. - 314 с.
22. Рузавин Г.И. Методы научного исследования. - М.: Мысль, 1984. - 238 с.
23. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: Справочн.изд. / В.З.Бродский, Л.И.Бродский, Т.И.Голикова и др. - М.: Металлургия, 1982. - 752 с.
24. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. - М.: Металлургия, 1982. - 224 с.
25. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В.Аметистов, В.А.Григорьев, Б.Т.Емцев и др.; Под общ.ред. В.А.Григорьева, В.М.Зорина. - М.: Энергоиздат, 1982. - 512 с.
26. Трохименко Я.К. Программирование микрокалькуляторов "Электроника МК-52" и "Электроника МК-61". - К.: Техника, 1987. - 208 с.
27. Цымбал В.П. Магнитическое моделирование металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1986. - 237 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Методологические основы научного познания и творчества	6
§ 1. Методология научного исследования	6
§ 2. Методы научного познания	7
Глава 2. Организация и планирование НИР	I3
§ 1. Цели и задачи научных исследований	I3
§ 2. Организация научных исследований в черной металлургии	I4
§ 3. Научно-исследовательская работа студентов /НИРС/	I6
§ 4. Планирование и выбор темы исследования	I8
§ 5. Основные виды исследований в металлургии . .	I9
§ 6. Составление технического задания и рабочего плана проведения исследования	21
§ 7. Составление научных прогнозов	22
Глава 3. Поиск и обработка научной информации	23
§ 1. Источники научной информации	23
§ 2. Методы поиска научной информации	25
§ 3. Составление рефератов и обзоров	27
§ 4. Научная коммуникация	30
Глава 4. Теория и методика эксперимента	31
§ 1. Эксперимент и его задачи	31
§ 2. Особенности эксперимента в лабораторных и полупромышленных условиях	32
§ 3. Особенности проведения промышленных экспериментов	34
§ 4. Основы теории метрологии	37
§ 5. Измерительная аппаратура. Средства измерения	41
§ 6. Применение ЭВМ в научных исследованиях . .	43
Глава 5. Элементы теории вероятностей и обработка экспериментальных данных	45
§ 1. Элементы теории вероятностей	45
§ 2. Математическое ожидание и дисперсия	48
§ 3. Основные законы распределения случайной величины	52
§ 4. Первичная обработка экспериментальных данных	59

§ 5. Метод наименьших квадратов	71
§ 6. Регрессионный анализ	73
§ 7. Корреляционный анализ	79
1. Дисперсионный анализ	86
2. Планирование эксперимента	93
§ I. Цели, задачи и возможности планирования эксперимента	93
§ 2. Факторы и параметры сплайнизации	95
§ 3. Рекомендации к выбору планов эксперимента .	98
§ 4. Получение линейных моделей исследуемого процесса	102
§ 5. Отсеивание факторов	106
§ 6. Нелинейные планы описания исследуемого процесса	III
§ 7. Полиномиальное описание системы "состав - свойство"	II6
§ 8. Экспериментальная оптимизация технологи- ческих процессов	120
§ 9. Оптимизация по математическим моделям .	127
Глава 7. Методы моделирования в металлургии	I31
§ 1. Основные методы моделирования	I31
§ 2. Основы теории поля	I33
§ 3. Физическое моделирование	I36
§ 4. Аналоговые модели	I41
§ 5. Математическое моделирование металлурги- ческих процессов	I43
§ 6. Моделирование на АВМ и программируемых микрокалькуляторах	I45
§ 7. Моделирование на ЭЦВМ	I51
Глава 8. Основные цели, задачи и методы исследований в области подготовки сырых материалов для доменного и ферросплавного процессов	I58
§ 1. Исследования в области производства окускованного сырья	I58
§ 2. Исследования в области доменного произ- водства	I65
§ 3. Исследования в области прямого получения железа и стали	I75

§ 4. Исследования в области ферросплавного производства	175
Глава 9. Основные цели, задачи и методы исследований в области сталеплавильных процессов	180
§ 1. Исследование кислородно-конвертерных процессов	180
§ 2. Исследования марганцовского процесса	192
§ 3. Исследования в области электросталеплавильных процессов	196
§ 4. Исследование процессов спецэлектрометаллургии	199
Глава 10. Исследования в области ковшевой обработки стали, разливки и качества металла	202
§ 1. Исследования в области ковшевой обработки стали	202
§ 2. Исследование процессов разливки стали	205
§ 3. Исследование качества стальных сливков, НЛЗ и изделий из них	212
Глава II. Организация труда в научном коллективе	216
§ 1. Основные методы управления научным коллективом	216
§ 2. Психологические аспекты взаимоотношений руководителя и подчиненного	216
§ 3. Принципы организации научного труда	217
§ 4. Гигиена научного труда	219
Глава 12. Оформление и внедрение результатов НИР	220
§ 1. Отчет о НИР	220
§ 2. Публикации научных материалов и заявки на изобретения	223
§ 3. Приемка и внедрение результатов НИР	225
Приложения	229
Список рекомендуемой литературы	240