

6  
А-612  
ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

---

На правах рукописи

ДЕМЕНТЬЕВ  
Валентин Матвеевич

ТЕПЛОВЫЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ЭНДОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

№ 05.14.04 — промышленная теплоэнергетика

Диссертация написана на русском языке

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

КИЕВ—1973

ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

---

На правах рукописи

ДЕМЕНТЬЕВ  
Валентин Матвеевич

ТЕПЛОВЫЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ЭНДОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

№ 05. 14.04 — промышленная теплоэнергетика

Диссертация написана на русском языке

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

КИЕВ—1973

ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
СЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ  
НАУК

Киев-57, Брест-Литовский пр., 102

№ 22 18 сентября 1973 г.  
Кому Государственной республиканской  
Адрес библиотеке Киевской ССР  
им. Чернышевского

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации В. М. Дементьева «Тепловые и аэродинамические основы организации высокотемпературных эндотермических процессов в кипящем слое», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета и прислать свои отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах).

Работа выполнена в Донецком научно-исследовательском институте черной металлургии и на Макеевском ордена Ленина металлургическом заводе им. С. М. Кирова.

Официальные оппоненты — член-корреспондент АН УССР, доктор технических наук, профессор **О. А. Кремнев**,  
— заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор **Н. И. Гельперин**,  
— доктор технических наук, профессор **А. П. Баскаков**.

Ведущее предприятие — Московский ордена Ленина энергетический институт.

Автореферат разослан 18 сентября 1973 г.

Защита диссертации состоится в 3-й декаде «октябрь» 1973 г. на заседании Объединенного ученого совета технических наук АН УССР (г. Киев, Брест-Литовский проспект, 102, 4-й этаж, конференц-зал Института электродинамики АН УССР).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электродинамики АН УССР.

Ученый секретарь совета  
канд. техн. наук

**О. М. КОСТЮК**

ВВЕДЕНИЕ

«Прогресс науки и техники, — говорил на XXIV съезде КПСС Генеральный секретарь ЦК КПСС Леонид Ильич Брежнев, — это главный рычаг создания научно-технической базы коммунизма».

Значительное место в промышленности принадлежит высокотемпературным процессам переработки ископаемого сырья. Сотни миллионов тонн руд черных и цветных металлов, флюсов, сырья для основной химии, цементной промышленности, промышленности огнеупоров и стройматериалов, добываемых ежегодно из недр земли, подвергаются в процессе своей переработки обжигу, спеканию, восстановлению и другим огнетехническим воздействиям, на организацию которых затрачивается около одной трети добываемого в стране топлива.

Одним из перспективных методов организации высокотемпературных процессов переработки ископаемого сырья является кипящий слой, открывающий возможность создания агрегатов высокой технологической и энергетической эффективности.

Первые исследования по кипящему слою были проведены в СССР Московским энергетическим институтом и ГИИцветметом в 1945—1946 гг. Первым процессом в кипящем слое, внедренным в промышленную практику в 1953—1957 гг., явился экзотермический обжиг цинковых концентратов.

Успехи цветной металлургии в освоении кипящего слоя для экзотермического обжига руд послужили импульсом к исследованию возможности организации этим методом других высокотемпературных процессов, в том числе и процессов эндотермических, идущих с потреблением тепла и занимающих доминирующее положение в индустрии переработки ископаемого сырья. В конце 50-х и в начале 60-х годов проведены работы по обжигу известняка (НИОХИМ, ИГ АН УССР, Механобрчермет, УПИ, ДПИ), обесфториванию фосфатов (МЭИ, НИУИФ, ТПИ), магнетизирующему обжигу руд (Механобр, ВНИИМТ, Механобрчермет, ИГ АН УССР, ДПИ, Укрчерметруда), прямому получению железа (Институт неф-

ти АН СССР, ЦНИИЧМ, ИМЕТ АН СССР, Башкирский филиал АН СССР, ИГ АН УССР, ИЧМ Минчермета СССР) и обжигу цементного и огнеупорного сырья (Гипроцемент, ВАМИ, ИТМО АН БССР, НИИцемент, ВЮ, Гипросталь). В процессе проведения этих исследований накоплен огромный экспериментальный материал, позволяющий выкристаллизовать те проблемы, вопросы и задачи, решение которых позволило создать работоспособный печной агрегат с кипящим слоем для организации высокотемпературных эндотермических процессов.

Коллективом лаборатории процессов в кипящем слое ДонНИИчермета теоретические и экспериментальные работы по созданию многозонных печей с кипящим слоем для эндотермического обжига проводятся с 1963 года. Автор диссертации принимал руководящее и непосредственное участие в этих работах, начиная с постановки задачи, теоретических разработок, лабораторных исследований и кончая промышленным освоением головного образца многозонной печи с кипящим слоем и развертыванием широкого фронта проектных работ по внедрению этого типа печей на предприятиях металлургической, горнорудной промышленности, основной химии и промышленности строительных материалов. По разработкам и исследованиям эндотермических процессов в кипящем слое автором издана монография, опубликовано более 50-ти статей и получено 10 авторских свидетельств.

Диссертация ставит своей задачей систематизацию, развитие и обобщение исследований, проведенных автором или при его участии в области теории и практики создания многозонных печей эндотермического обжига в кипящем слое. Наряду с проведением экспериментальных работ и аналитических исследований для познания физической сущности изучаемых явлений, в диссертации большое внимание уделено доведению разработок до инженерных методов расчета отдельных процессов или узлов печи с целью восполнения известного пробела между исследователем — технологом и проектировщиком и ускорения решения их общей задачи — промышленной реализации эндотермического процесса в кипящем слое.

Решение поставленных задач по созданию многозонных печей с кипящим слоем обусловлено не только большим объемом экспериментальных и аналитических исследований, проведенных под руководством автора, но и созданием к настоящему времени фундаментальных знаний по технике псевдо-

ожигания, общей и промышленной теплоэнергетике, а также смежным технологическим проблемам. Значительный вклад в науку о кипящем слое внесли коллективы, возглавляемые Н. И. Гельпериным, С. С. Забродским, О. М. Тодесом, П. Г. Романковым, Г. Я. Лейзеровичем, Н. И. Сыромятниковым, А. П. Баскаковым, Н. А. Шаховой, К. Е. Махориным, а также зарубежными коллегами М. Левоу, Д. Ф. Отмером, И. Ф. Девидсоном, Д. Харрисоном, Ж. Беранеком и Д. Соколом и другими. Вопросы общей и промышленной теплоэнергетики получили развитие в трудах А. А. Гухмана, Н. А. Семененко, М. А. Глинкова, В. Ф. Копытова. Смежные технологические проблемы успешно разрабатываются Н. И. Красавцевым, З. И. Некрасовым, В. И. Кармазиным, В. Г. Губиным, П. А. Тациенко, С. И. Вольфовичем, М. А. Вейдерма, Х. С. Воробьевым, Г. С. Вальбергом и другими учеными.

Создание новой техники — задача комплексная, требующая оценки показателей производительности, качества продукции, анализа технологической устойчивости процесса. Специфика создания печного агрегата для эндотермического обжига в кипящем слое требует также освоения методов ввода топлива в слой, разработки конструкции многозонных печей для утилизации физического тепла твердых и газообразных продуктов, исследования аэродинамики промежуточных решеток и переточных устройств. Кроме того, каждый технологический процесс имеет свои теплотехнические особенности, требующие учета как при создании собственно агрегата, так и при разработке схемы его включения в технологический поток данного производства.

Решение этого комплекса вопросов изложено в диссертации, состоящей из трех разделов.

В первом разделе рассмотрены общие вопросы организации гетерогенных процессов в кипящем слое. Второй раздел посвящен теоретическим основам создания многозонных печей с кипящим слоем. В третьем разделе дается анализ термодинамических и теплотехнических особенностей некоторых технологических процессов, организуемых в печах кипящего слоя; в этом же разделе рассмотрены вопросы экономики и состояние промышленной реализации этих процессов. В выводах сформулированы основные результаты работы.

Проведение представленной работы было бы затруднено без помощи моих аспирантов и сотрудников лаборатории процессов в кипящем слое ДонНИИчермета и активного участия

коллектива Макеевского ордена Ленина металлургического завода в освоении головного образца многозонной печи с кипящим слоем. Настоящая работа, находящаяся на «стыке наук», была бы затруднена также без творческого сотрудничества с рядом институтов, ведущих технологические исследования в области металлургии (ИГ АН УССР, ЦНИИчермет, Механобрчермет, Укрчерметруда), химии (МИТХТ им. Ломоносова, НИОХИМ, НИУИФ, Таллинский политехнический) и промышленности строительных материалов (ВНИИ-стром, Южгипроцемент).

Всем им автор выражает самую сердечную благодарность.

Диссертация имеет 279 стр. текста и 119 рисунков. Список литературы содержит 410 наименований.

## РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

#### 1. Балансные условия. Аэродинамика слоя.

Роль гетерогенных процессов в производственной деятельности человека чрезвычайно велика. Многочисленные теоретические исследования и богатый экспериментальный материал позволили выработать сравнительно четкое представление о химизме реакций и физической картине протекания исследуемых процессов. Приступая, на основе этих знаний, к организации гетерогенного процесса, необходимо дополнительно учесть реальные условия обеспечения этих процессов необходимым количеством реагента (теплоносителя, окислителя, восстановителя и т. д.). Очевидно, в разумном сочетании кинетических и балансных условий следует искать оптимальные условия организации гетерогенного процесса.

В работе приведен анализ этих условий. Установлены балансная и кинетическая области организации гетерогенных процессов. Показано, что производительность процесса в кипящем слое в балансной области определяется аэродинамической нагрузкой слоя.

В настоящее время представляет интерес получение теоретического уравнения аэродинамики кипящего слоя, дающего без эмпирических коэффициентов удовлетворительное совпадение с опытом и справедливого во всем диапазоне существо-

вания кипящего слоя. Вывод оказался возможным при учете градиентности газового потока в уравнении равновесия отдельной шаровой частицы в однородном псевдооживленном слое:

$$-\frac{\pi d^3}{6} \cdot \gamma_r - C \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{w_{отн}^2}{2g} \cdot \gamma - \int_V \text{grad} P dV = 0 \quad (1)$$

Решение уравнения (1) позволяет четко выделить влияние стесненности витания и представить его как увеличение кажущейся вязкости потока из-за наличия в нем взвешенных частиц. Используя теоретическую зависимость В. Ванда для определения кажущейся вязкости суспензии в зависимости от порозности системы, получили для ламинарной области теоретическое уравнение псевдооживления в безразмерном виде:

$$\text{Re} = \frac{1}{18} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\exp \frac{2,5(1-\varepsilon)}{1-0,609(1-\varepsilon)}} \cdot \text{Ar} \quad (2)$$

Функция порозности в (2) аппроксимируется выражением  $\varepsilon^{1,57}$ , что незначительно (на 1,75%) отличается от эмпирического  $\varepsilon^{1,65}$ , полученного Г. Ф. Ричардсоном и В. Н. Заки.

При рассмотрении инерционного режима была высказана рабочая гипотеза о нулевом эффекте стесненности витания, так как влияние вязкости в этой области отсутствует, независимо от ее абсолютного или кажущегося значения, увеличенного за счет присутствия дисперсной фазы в потоке.

Это предположение было подтверждено экстраполяцией на турбулентный режим зависимости, полученной на основе данных разных авторов по расширению слоя, и экспериментами автора с крупными частицами при  $\text{Ar} = 10^8 - 10^9$ .

Тогда уравнение для турбулентного режима запишется в виде

$$\text{Re} = \text{const} \cdot \varepsilon^{1,5} \cdot \text{Ar}^{0,5} \quad (3)$$

Константа в (3) учитывает форму частиц. Ее среднее значение по данным Эргана равно 0,76.

В переходной области зависимость может быть аппроксимирована уравнением типа (3) с соответствующим изменением коэффициентов и показателей или записана в виде уравнения О. М. Тодеса. Оба решения в диссертации представлены.

Дополнив уравнение аэродинамики (2) или (3) условием материального (теплового) баланса слоя

$$Gq = V\Delta i, \quad (4)$$

получили уравнение производительности процесса в балансной области

$$M = \text{const} \cdot m \cdot Ar^k, \quad (5)$$

где  $M = \frac{Gqd}{v\Delta i}$  — критерий удельной производительности процесса в балансной области.

На рис. 1 представлена зависимость (5) для различных

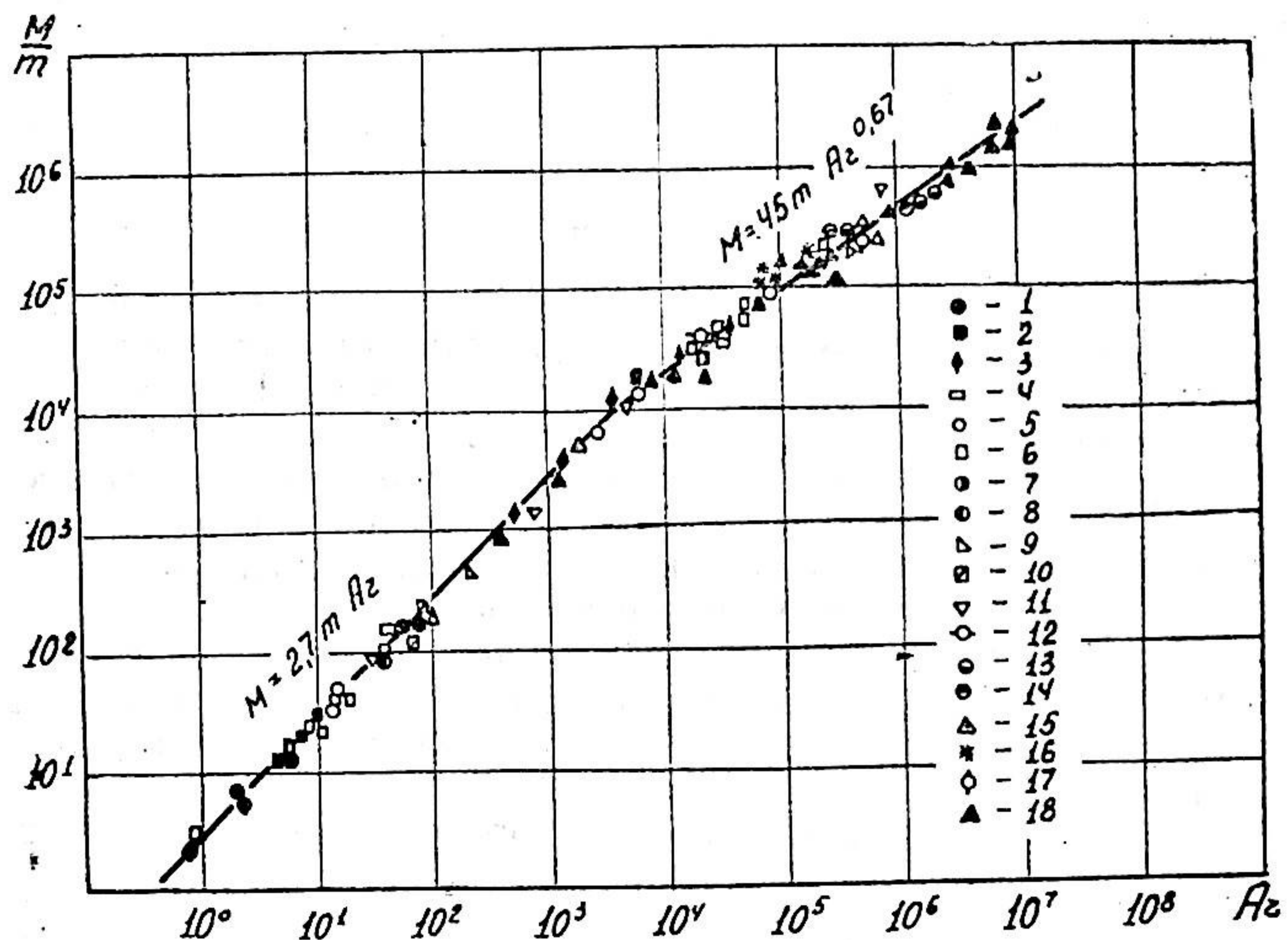


Рис. 1. Зависимость критерия удельной производительности  $M$  в балансной области от числа  $Ar$ . Процессы восстановления: 1 — закиси никеля, 2 — цинковых огарков, 3 — сурьмяных руд, 4 — железных руд; экзотермический обжиг 5 — свинцовых руд, 6 — цинковых концентратов, 7 — никелевого файнштейна, 8 — никелевого концентрата, 9 — колчедана, 10 — золотосодержащих концентратов, 11 — гранул медных концентратов; магнетизирующий обжиг 12 — криворожских кварцитов, 13 — табачных руд; сушка 14 — угля, 15 — медноцинковой шихты; охлаждение 16 — гранул мочевины, 17 — гранул аммиачной селитры, 18 — обжиг известняка

процессов. В представленном диапазоне изменений числа  $Ar$  зависимость (5) аппроксимирована двумя уравнениями

$$\text{при } 1 < Ar < 5 \cdot 10^3 \\ M = 2,7 \cdot m \cdot Ar \quad (6)$$

$$\text{при } 5 \cdot 10^3 < Ar < 10^7 \\ M = 45 \cdot m Ar^{0,67} \quad (7)$$

Раскрывая критерий  $M$  для конкретного технологического процесса, можем определить влияние различных параметров на производительность процесса в балансной области.

## 2. Кинетические условия. Диффузия частиц

Для описания процесса в кинетической области уравнение аэродинамики (1) необходимо дополнить условием

$$G\tau = h \cdot \gamma_T \cdot (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

Основной трудностью решения уравнения (8) для условий кипящего слоя является поиск необходимого времени обработки частиц

$$\tau = \tau_x \cdot \varphi(\rho), \quad (9)$$

где  $\tau_x$  — время собственно процесса по кинетическим условиям его организации;  
 $\varphi(\rho)$  — функция распределения, учитывающая перемешивание частиц в кипящем слое.

При определении времени собственно процесса  $\tau_x$  рассмотрен типичный эндотермический процесс — диссоциация карбонатов. Обжиг шаровой частицы известняка по характеру протекания процессов тепло- и массообмена принадлежит к краевым задачам с движущимися границами. Поскольку разложение известняка при высоких температурах окружающей среды определяется в основном скоростью подвода тепла к частице, то математически задача сводится к решению уравнения

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 t(\tau, r)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(\tau, r)}{\partial r} \right] \quad (10)$$

при краевых условиях

$$\begin{aligned} \tau = 0 \quad R < r < x & \text{ а) } \\ t(x, \tau) = t_p = \text{const} & \text{ б) } \\ t(R, \tau) = t_{cr} = f(t_{cp}, t_p, \alpha) & \text{ в) } \quad (11) \\ \lambda_1 \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial r} = q \gamma \tau \frac{\partial x}{\partial t} & \text{ г) } \end{aligned}$$

Решение уравнения (10) при краевых условиях (11) и ряде упрощающих предпосылок (предварительный и равномерный прогрев частицы, отсутствие усадки) дало при  $Bi < 1$ :

$$\tau_x = \frac{q \gamma d^2}{6 \lambda \Delta t Nu} \quad (12)$$

При подстановке зависимости (12) в (9) и (8) после преобразований получили безразмерное уравнение производительности эндотермического процесса в кинетической области

$$L = 6(1 - \varepsilon) \frac{h}{d} Nu \frac{1}{\varphi(\rho)}, \quad (13)$$

где  $L = \frac{Gqd}{\lambda \Delta t}$  — критерий удельной производительности эндотермического процесса в кинетической области.

Неизвестной в уравнении (13) является функция распределения  $\varphi(\rho)$ , оказывающая существенное влияние на степень обработки частиц в кипящем слое. Для определения средней степени обработки материала воспользовались гипотезой Ребу, развитой затем В. Ф. Фроловым и П. Г. Романковым, о наличии времени запаздывания  $\Delta\tau$  при распределении частиц в аппарате. Тогда средняя степень обработки определилась как

$$\sigma = \int_0^{\infty} \sigma(\tau) \frac{e^{-\frac{\tau - \Delta\tau}{\tau_0 - \Delta\tau}}}{\tau_0 - \Delta\tau} d\tau \quad (14)$$

При линейной кинетической зависимости  $\sigma(\tau)$  получили

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \left[ 1 - (1 - \theta) e^{-\frac{\beta - \theta}{1 - \theta}} \right], \quad (15)$$

где  $\beta = \tau_x / \tau_0$  — относительное время обработки;  
 $\theta = \Delta\tau / \tau_0$  — относительное время запаздывания.

Определение  $\theta$  производили путем сравнения кривых выхода материала на опытной установке диаметром 250 мм и промышленной печи диаметром 2750 мм при обжиге известняка в тех же кинетических условиях. Кривые снимались с помощью радиоактивного изотопа Са-45 с периодом полураспада 152 дня и энергией излучения частиц 0,254 МэВ.

Условия моделирования (распространения метода определения на подобные условия) требуют установления ее зависимости от безразмерного параметра Пекле  $Pe$ , для расчета которого необходимо знать коэффициент диффузии. Опыты по его определению производились на плоской модели «тонкого» кипящего слоя с размерами 1000×100 мм. В качестве сыпучего и меченого материала использовали пшено со средним размером частиц 2,025 мм и удельной массой 1284 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты экспериментов представлены в виде зависимости

$$\frac{D}{H_0^{1.5} g^{0.5}} = 0,028(m - 1)^2 \quad (16)$$

справедливой при  $m \leq 2,7$ ; при  $m > 2,7$  комплекс имеет постоянное значение.

При известном из (16) коэффициенте диффузии  $D$  подсчитали критерий  $Pe$  для условий промышленного эксперимента по определению  $\theta$ . При этом в качестве определяющего линейного размера был принят диаметр печи. Получена зависимость для определения  $\theta$ .

$$\theta = 1 - \exp(-2,3Pe) \quad (17)$$

Совместное решение уравнения (15), (16) и (17) позволяет получить и рассчитать функцию распределения

$$\varphi(\rho) = \frac{\sigma}{1 - (1 - \theta) \exp\left(-\frac{\beta - \theta}{1 - \theta}\right)} \quad (18)$$

и представить безразмерное уравнение производительности в кинетической области в окончательном виде. При этом для условий кипящего слоя целесообразно заменить  $Nu = f(Re) = \varphi(Gr)$ . Такая зависимость для процесса обжига известняка

на экспериментальной установке диаметром 270 мм и промышленной печи диаметром 2750 мм представлена на рис. 2. Обобщающая зависимость описывается уравнением

$$L = 0,15(1 - \varepsilon) \frac{h}{d} \text{Ar}^{0,45} \cdot \frac{1 - (1 - \theta) \exp\left(-\frac{\beta - \theta}{1 - \theta}\right)}{\sigma} \quad (19)$$

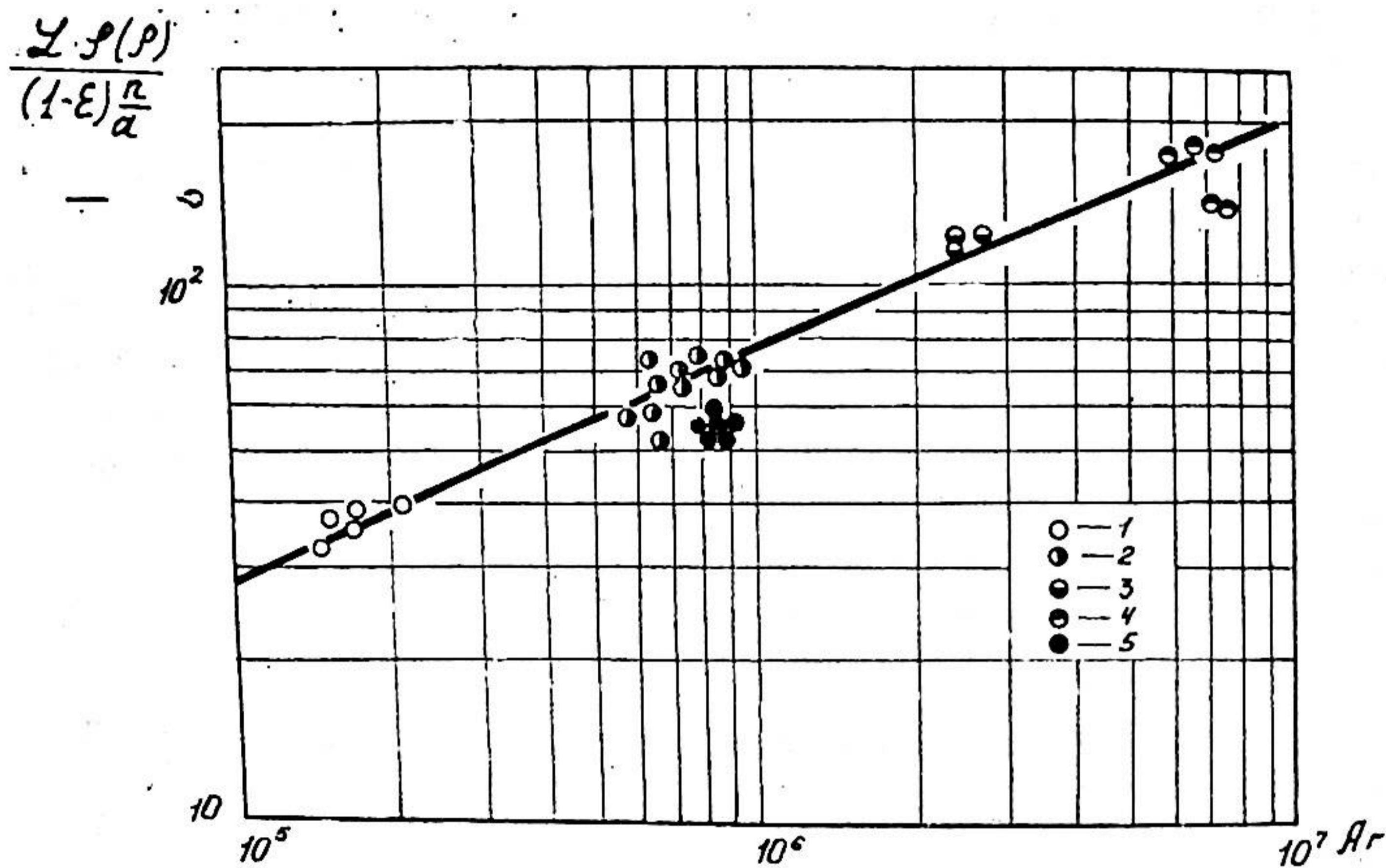


Рис. 2. Зависимость удельной производительности в кинетической области от числа  $\text{Ar}$ . Процесс — обжиг известняка. Данные экспериментов на установке  $\varnothing 270$  мм при обжиге фракций 1—3—5 мм; 2—5—8 мм; 3—8—12 мм; 4—12—14 мм. Данные работы промышленной печи  $\varnothing 2750$  мм при обжиге фракций: 5—3—10 мм

Совместное решение уравнений производительности процесса в балансной — (6) и (7) и в кинетической — (19) областях позволяет полностью рассчитать процесс в зависимости от особенностей кинетики, температуры процесса, необходимой степени обжига, высоты слоя, размера частиц и аппарата, числа псевдооживления и других параметров, а также найти их оптимальные значения в конкретных производственных условиях. Не менее важным свойством полученных зависимостей является возможность переноса результатов опытов на малых установках на промышленную печь или от обратного, опреде-

лить условия эксперимента, дающие наиболее достоверные результаты для переноса в промышленность. В свете этих требований предпочтение следует отдать экспериментальным установкам периодического действия как дающим более полную информацию по кинетике процесса.

### 3. Аэродинамическая устойчивость кипящего слоя слипающихся материалов

Высокотемпературные процессы в кипящем слое в той или иной степени связаны с определенной долей размягчения или даже оплавления обрабатываемых частиц. Нередко это приводит к образованию конгломератов, выпадению их из слоя, постепенному накоплению, свариванию и, в конечном счете, к прекращению кипения. В работе дается анализ аэродинамической устойчивости ряда процессов в кипящем слое (обжиг сернистых руд и нерудных металлов, прямое получение железа). Показано, что очагом образования сгаров является неподвижный слой материала между отверстиями решетки. Этот слой необходимо либо устранить конструктивными мерами (конусный аппарат, сотовая решетка), либо нейтрализовать. Методом нейтрализации является хорошо известный в котельной практике принцип холодного низа топки при «сухом» шлакоудалении. Нарушение этого принципа было причиной неудач первых опытов по обжигу цементного клинкера, нефелиновых шихт и огнеупорного сырья. Соблюдение холодного низа слоя возможно при установлении заданной эпюры температур по высоте слоя, что накладывает определенные условия на метод ввода тепла в слой. С этой точки зрения при обжиге спекающихся материалов нецелесообразно предварительное сжигание топлива и подача горячих газов под решетку. Предпочтение следует отдать сжиганию топлива в самом слое с оттеснением зоны горения в область развитого кипящего слоя.

Второй проблемой аэродинамической устойчивости кипящего слоя слипающихся частиц является определение допустимого количества жидкой фазы в зависимости от ее свойств, свойств твердой фазы и аэродинамических условий псевдооживления. Трудностью установления такой закономерности в «горячих» условиях является необходимость посадки, сваривания слоя в каждом эксперименте. Поэтому пошли по пути холодного моделирования процесса. Аналитическое исследо-



вание процесса показало наличие дополнительной склеивающей силы, зависящей от относительного количества жидкой фазы

$$\frac{F}{\sigma_{ж}d} = f(q_0) \quad (20)$$

Значением этой силы было дополнено уравнение аэродинамики слоя (1) и получено безразмерное уравнение

$$q_0 = \text{const. } De^p (m - 1)^n, \quad (21)$$

где  $De = \frac{d^2 \gamma_T}{\sigma_{ж}}$  — критерий устойчивости слоя слипающихся частиц, характеризует отношение объемных сил разрыва к поверхностным силам сцепления (адгезии). Назван критерием Дерягина.

Эксперименты по слипаемости частиц в кипящем слое были произведены на модели диаметром 146 мм. Твердым материалом служил кварцевый песок фракций 0,5—0,7; 1,0—1,25; 1,25—1,6; 2,25—2; 3—5 мм, известняк фракции 2—2,5 мм и алюминиевая дробь. Жидкая фаза была представлена глицерином, этиленгликолем и подсолнечным маслом. Данные экспериментов обобщены уравнением (21) с точностью 9,2%:

$$q_0 = 3 \cdot 10^{-3} \cdot De^{0,65} \cdot (m - 1)^n \cdot \left( \frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} \right)^{-0,58} \quad (22)$$

где

$$n = 1,13d^{0,1} \approx 1$$

В формулу (22) введено отношение сопротивлений слоя и решетки, влияние которого при  $\Delta P_c / \Delta P_p < 1$  установлено в процессе экспериментирования. Формула (22) справедлива при  $0,15 < De < 14$ ;  $1 < m < 5$ ;  $0,2 < \Delta P_c / \Delta P_p < 1$  и дает общую зависимость допустимого количества жидкой фазы от физических свойств расплава  $\sigma_{ж}$ , твердой фазы  $d$  и  $\gamma_T$  и условий псевдооживления  $m$ . Зная величину  $q_0$  для конкретного технологического процесса, можно определить условия его устойчивой (без слипания) организации в кипящем слое.

## РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ МНОГОЗОННЫХ ПЕЧЕЙ С КИПАЩИМ СЛОЕМ

#### 1. Многозонные печи. Методы теплового расчета.

Кипящий слой как теплообменник между газом и твердым материалом может быть смешивающего, противоточного типов или с перекрестным током. Признаком смешивающего теплообменника является завершение теплообмена по высоте слоя. Тепловой расчет смешивающего теплообменника ведется по уравнению теплового баланса.

Противоточный теплообменник создается установкой кипящих слоев, последовательно включенных по газу и также последовательно (но в противоположном направлении) по материалу. В работе дается вывод уравнения для расчета такого теплообменника с  $n$  кипящими слоями

$$CX^{n+1} - (C + 1)X^n + 1 = 0, \quad (23)$$

где  $C$ ,  $X$  — известный и неизвестный температурные симплексы. Уравнение (23) не имеет точного решения. Приближенное численное решение (23) выполнено на электронно-вычислительной машине «Проминь-М» и представлено в виде номограммы и таблицы.

Теплообменник с перекрестным током создается в условиях промышленных печей разделением зоны кипящего слоя на  $i$  секций, работающих параллельно по газу и включенных последовательно по материалу. Температура материала зоны с  $i$  секциями

$$t = t_1 \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{i}\right)^i} + t_0 \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{i}\right)^i} \right] \quad (24)$$

Многозонная печь с кипящим слоем рассмотрена как совокупность предварительного противоточного (зоны подогрева), смешивающего (зона обжига) и последующего противоточного (зоны охлаждения) теплообменников. Их уравнения тепловых балансов, решенные относительно удельного расхода газа (топлива), представлены в виде

$$\left(\frac{V}{G}\right)_n = \frac{c_1}{k c_2 \eta_{oc}} \cdot \frac{1}{X_n} \quad (25)$$

$$\left(\frac{V}{G}\right)_o = \frac{c_1(t_o - t_1) + \Sigma q}{(Q_p^H - k c_2 t_o + L_o c_3 t_{1ox}) \eta_{oc}} \quad (26)$$

$$\left(\frac{V}{G}\right)_m = \frac{c_4 \eta_{oc}}{L_o c_2} \cdot X_m \quad (27)$$

В связи со взаимным влиянием параметров трех групп теплообменников требуется решение методом последовательных приближений, что связано с большим объемом вычислительной работы. Положение осложняется отсутствием точного решения уравнения (23) для определения  $X$  и необходимостью пользования номограммой или таблицей. Для обеспечения решения этой задачи разработан метод графического совмещения уравнений (25—27), представленный на рис. 3. Путем «обхода» кривых достигается необходимая степень приближения.

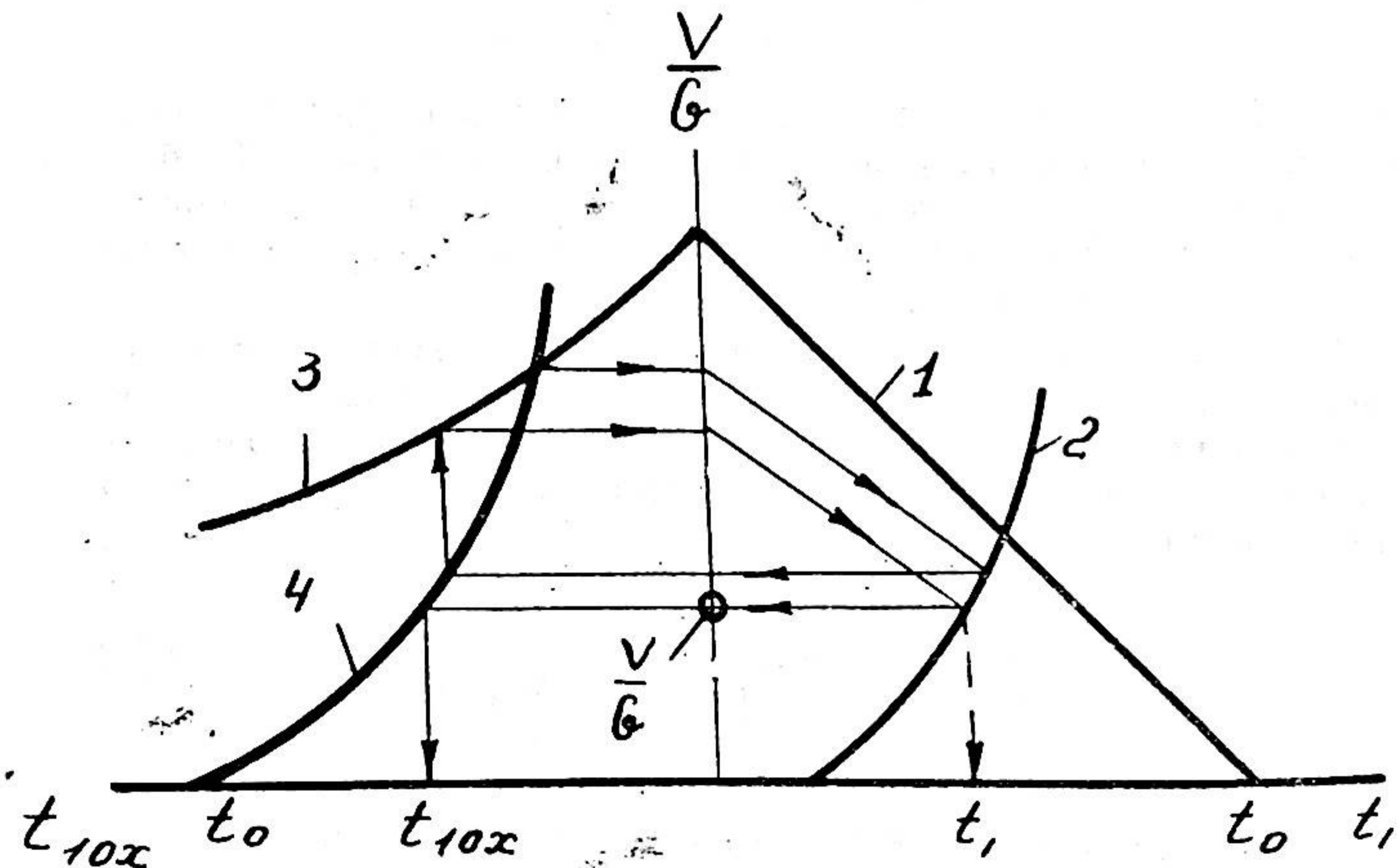


Рис. 3. График совместного расчета зон подогрева, обжига, охлаждения. Кривые 1 — зоны обжига по формуле (26) при  $t_{1ox} = 0,2$  — зоны подогрева по формуле (25), 3 — зоны обжига по формуле (26) при  $t_1 = 0,4$  — зоны охлаждения по формуле (27)

Такое решение даст значение удельного расхода газа (топлива)  $V/G$ , температур в первой зоне подогрева  $t_1$  и в первой зоне охлаждения  $t_{1ox}$ . По этим данным определяется температура последней или любой предыдущей зон подогрева (охлаждения).

В диссертации рассмотрены особенности тепловых расчетов печей при истирании материала в зонах обжига и охлаждения, диссоциации в зонах подогрева и обжига, использования тепла газообразных продуктов диссоциации в зонах подогрева, рециркуляции газов с использованием их тепла в зоне обжига или зонах подогрева.

Особый интерес как большой резерв повышения теплотехнической эффективности и снижения количества зон, представляет создание многозонных печей с секционированными зонами подогрева и охлаждения для организации в них перекрестного тока. В этом случае в уравнения (28) и (29) вводится поправочный коэффициент  $A_{n(m)} = f(i, X)$  и задача сводится к предыдущей.

Рассмотрены вопросы поиска энергетически оптимального количества зон печи по суммарным затратам тепловой (уменьшающейся при увеличении количества зон) и электрической (имеющей обратный рост) энергии. Задача сводится к нахождению минимума функций

$$\Sigma Q = f(n, m, \xi) \quad (28)$$

Выполняется это графическим способом. Причем, в связи с плавным изменением функции (28) более наглядно графическое представление не самой функции, а темпа ее изменения.

На основе изложенных выше выводов автором разработаны и описаны в монографии \* методы расчета печей с кипящим слоем различного технологического назначения: для обжига известняка, мела, доломита, глины, руд и железорудных окатышей.

## 2. Исследование сжигания газа в кипящем слое

Ряд работ по исследованию сжигания газа в кипящем слое выполнены под руководством С. С. Забродского,

\* Дементьев В. М. «Тепловые расчеты многозонных печей с кипящим слоем», изд-во «Металлургия», 1971 г.

Н. И. Сыромятникова, А. П. Баскакова, К. Е. Махорина. Для их выполнения выбирался как правило огнеупорный материал: корунд, шамот, кварцевый песок, магнезит. Природные сыпучие материалы не обладают такой огнеупорностью, подвержены размягчению и оплавлению, что (как уже было рассмотрено выше) требует организации сжигания топлива со строго определенной эпорой температур по высоте слоя. Изучение распределения температур по высоте слоя — основная задача наших исследований по сжиганию газа.

В диссертации рассмотрена возможность аналитического решения задачи. Получен сложный профиль температурной кривой с явно выраженной зоной подогрева до температуры зажигания, зоной горения и зоной охлаждения продуктов горения до температуры слоя. Однако совпадение с опытом получено только качественное — в связи с рядом упрощающих предпосылок. Необходим эксперимент.

Эксперимент был проведен на опытной установке кипящего слоя сечением  $300 \times 300$  мм с одной горелкой. Масштаб модели определен из условия непосредственного переноса испытываемой горелки на промышленную печь. Установка оборудована комплектом контрольно-измерительных приборов. В качестве материала использовался известняк фракции 2,5—10 мм, топлива — природный газ с  $Q''_p = 35,5 \cdot 10^7$  кДж/нм<sup>3</sup>. Эюра температур снималась при непрерывной работе установки в стационарном режиме хромель-алюмелевой термопарой с электродами  $d = 1,5$  мм и «голым» спаем. Термопара перемещалась вертикально по центру рабочей камеры. Использовались горелки с предварительным смешением газа и воздуха — горелки № 1 и № 2, с полуподготовленной смесью (струйное смешение на выходе) — горелка № 3 и раздельной подачей газа и воздуха (типа «труба в трубе») — горелка № 4. В процессе экспериментов температура кипящего слоя изменялась в пределах  $770$ — $1170^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  от 1,1 до 1,7 и суммарный расход оживающей среды от 239 до 539 нм<sup>3</sup>/час.

Типичные кривые распределения температуры по высоте слоя для различных горелок представлены на рис. 4.

При обработке экспериментов основное внимание, в свете поставленной задачи, было обращено на определение температуры зажигания в слое и высоты фронта зажигания. На основе теории теплового зажигания Я. Б. Зельдовича, развитой затем Л. Н. Хитриным и С. А. Гольденбергом, получены формулы для определения искомых величин.

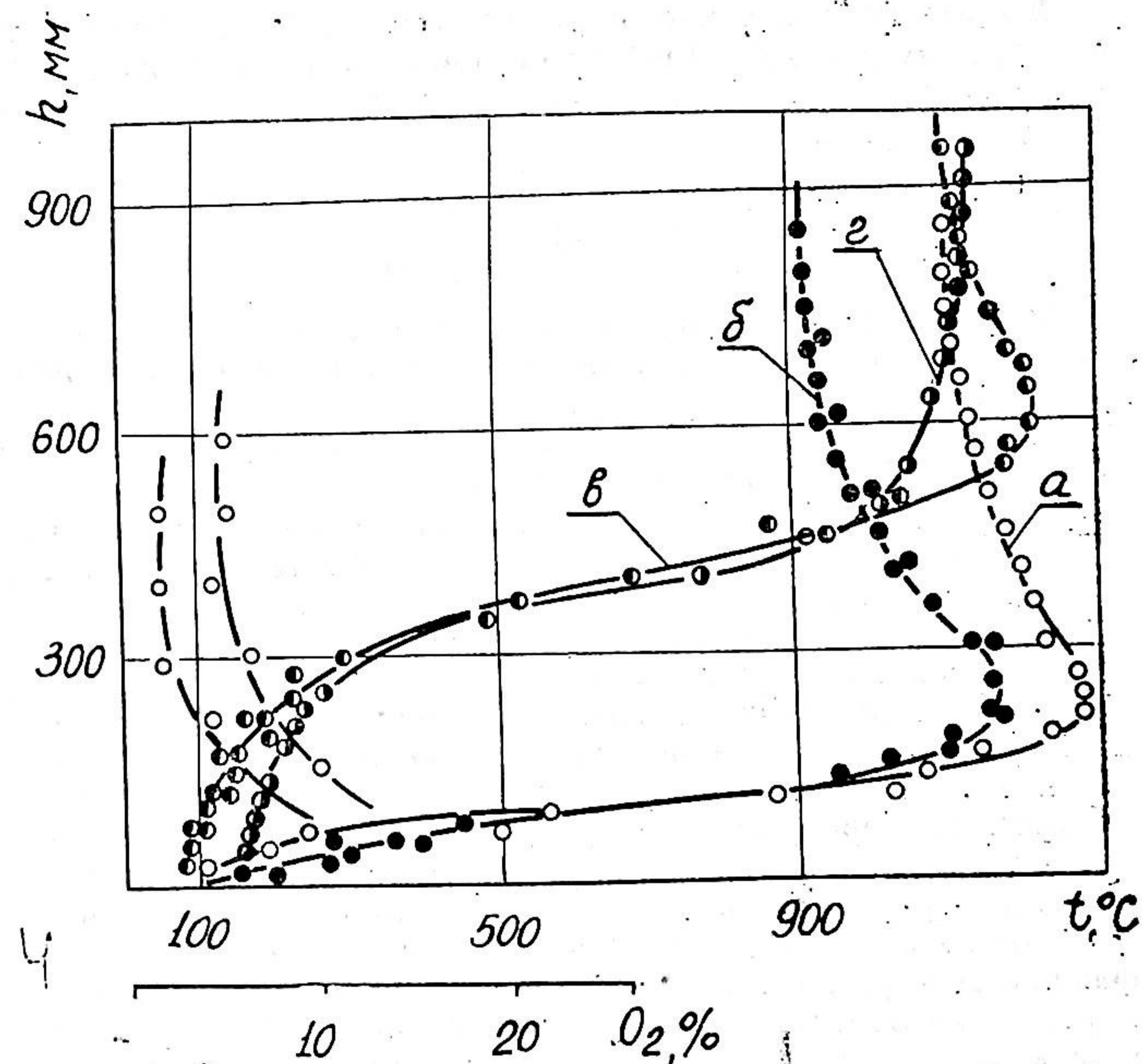


Рис. 4. Распределение температуры по высоте слоя при использовании горелок: а—б — с предварительным смешением газа и воздуха; в — с полуподготовленной смесью (струйное смешение), г — с раздельной подачей газа и воздуха (типа «труба в трубе»)

Температура воспламенения зависит от скорости газового потока и коэффициента избытка воздуха. Описывается с точностью 7,1% формулой:

$$T = \varphi \left[ \frac{W}{U(\alpha)} \right]^{0,25} \cdot T_0 \quad (30)$$

Величина  $\varphi$  для разного типа горелок изменялась в пределах 0,93—1,24, что дает основание считать ее примерно равной единице.

Высота фронта зажигания зависит от типа горелки и температурных условий. Для диффузионной горелки типа «труба в трубе» данные экспериментов аппроксимируются с точностью 10,3% формулой

$$\frac{h}{d} = 58 \cdot Fr^{0.2} \cdot \lg \frac{T_{ч} - T}{T_{ч} - T_{нач}} \quad (31)$$

В диссертации приводятся аналогичные полуэмпирические формулы для определения протяженности зоны горения, зависящей в основном от коэффициента избытка воздуха и скорости потока, а также величины пика температур, определяемого протяженностью зоны горения.

Полученные зависимости позволяют определить «реперные» точки температурной кривой и приступить к организации сжигания газа в слое спекающихся частиц. В качестве спекающегося материала была выбрана табачная руда Керченского месторождения фракции 0—3 мм, образующая настыл при обжиге во вращающихся печах при температуре 950°C. Эксперименты проводились на опытной печи кипящего слоя сечением 310×310 мм, оборудованной автоматическим регулятором температуры по загрузке материала. Первая серия опытов была проведена со щелевой беспламенной горелкой, дающей корку свара на откосах твердого материала вокруг горелки из-за частичного сгорания газа в пограничном слое факела. Для устранения этого явления необходимо было изолировать газоздушную смесь от откосов материала воздушным кольцом, что достигнуто при использовании горелки типа «труба в трубе». Опытная установка была оборудована 4-мя горелками с газовыми соплами  $\varnothing 2,7$  мм и воздушной трубой  $\varnothing 14$  мм (скорость истечения соответственно 100 и 10 м/сек). Эксперименты показали устойчивую работу слоя без образования сваров при температуре слоя до 1050°C. С такими же горелками были проведены эксперименты по обжигу в кипящем слое вспучивающихся глини и вулканических пород, а также обжигу глини на шамот. Метод сжигания газа и конструкция горелки обеспечили устойчивый процесс обжига.

Промышленное испытание и освоение горелочных устройств производились на печи обжига известняка в кипящем слое диаметром 2750 мм Макеевского металлургического завода. Вначале испытывался боковой метод ввода газа соплами и муфельными горелками непосредственно в кипящий

слой, оказавшийся неприемлемым для печи такого масштаба (пробивная сила струи не превышала 0,5 м). Боковые сопла демонтированы, муфельные горелки оставлены в качестве розжиговых.

К промышленному освоению был принят донный метод ввода газа в слой. Подина зоны обжига представляла собой набор горелок.

Первая серия опытов была проведена с донными горелками, работающими на подготовленной смеси и имеющими выходные насадки щелевого типа с критическим для метана размером щели 0,8 мм; при хороших технологических показателях работы, горелки оказались неустойчивы в эксплуатации: при забивании щелей пылью горелка сгорала, и на подине образовывались свары.

Вторая серия опытов была проведена с прямоточными горелками и струйным смешением газа. Горелки показали большую эксплуатационную устойчивость. Однако при попадании в печь посторонних предметов (руды, агломерата) сваров избежать не удалось.

Третья серия опытов была проведена с прямоточными горелками диффузионного типа («труба в трубе»). Горелки обеспечили удовлетворительное сжигание газа и достаточную эксплуатационную надежность. С такими горелками печь сдана в промышленную эксплуатацию.

Отработанные на печи Макеевского завода прямоточные горелки со струйным или диффузионным смешением газа и воздуха рекомендованы для сжигания газа в кипящем слое при организации различных технологических процессов. Такие горелки заложены нами в проекты печей обжига известняка, шамота, окатышей, использованы при сооружении печей обжига керамзита, фосфатов и других материалов.

На печь кипящего слоя с прямоточными горелками автору совместно с Ю. П. Нехлебаевым выдано авторское свидетельство\*.

### 3. Исследование промежуточных решеток

Создание многозонных печей с кипящим слоем требует отработки конструкции и режима работы промежуточных решеток трех типов: для зон подогрева, обжига и охлаждения.

\* В. М. Дементьев, Ю. П. Нехлебаев. Шахтная печь кипящего слоя для обжига сыпучих материалов. А. с. № 239101, приоритет от 30 июля 1966 г.

Для зон охлаждения приемлемы освоенные решетки с кольцевыми распределителями, подина зоны обжига при сжигании газа является набором газораспределительных устройств. Наибольший интерес представляет создание промежуточных решеток зон подогрева, работающих при высоких температурах и в запыленном газовом потоке. На промышленной печи диаметром 2750 мм испытывались два типа решеток: из жаропрочного металла и шамота.

Металлическая решетка, состоящая из литой крестовины стали Х25 и секторов стали Х25Н20С2, показала неудовлетворительную механическую стойкость при температуре выше 800°C.

Решетка из шамотных блоков была разработана и установлена на печи. Основу решетки составляет элемент (блок) размером в плане 250×250 мм, имеющий клиновидную форму боковой поверхности и одно отверстие в центре\*.

Основное требование к решетке как к аэродинамическому устройству — стабильность во времени аэродинамических характеристик: формы и размера канала, величины живого сечения.

Опыты проводились с отверстиями в решетке от Ø 15 мм до Ø 72 мм. Отверстия малого размера заклинивались частицами и затем забивались пылью в первые же часы работы. Отверстия Ø 48, 60 и 72 не заклинивались частицами. Таким образом, при максимальном размере обжигаемого материала 12 мм потребовалось 4—5-кратное увеличение размера отверстий для прекращения заклинивания.

Отложения сухой пыли в каналах керамической решетки были устранены после выполнения правильной аэродинамической формы канала. Наросты в каналах наблюдались при температурах выше 1100—1200°C.

Выбор величины живого сечения решетки определяет качество псевдооживления и эффект «захлебывания» отверстий при пульсациях. Рассмотрена система решетка — кипящий слой в двух произвольно выбранных сечениях. С учетом величины пульсаций давления в слое по зависимости М. С. Юфа, получили:

$$\frac{1}{f^{0.4}} = 1,11 \cdot 10^{-4} \cdot z, \quad (32)$$

\* Дементьев В. М., Школьников В. Н., Канфер В. Д., Шкляр М. С. Фасонный огнеупорный блок А. с. № 175905, приоритет от 10 августа 1969 г.

где

$$z = \frac{D_{ан}^{0.1} d^{0.05}}{d_{ч} \cdot \nu^{0.2}} \left( \frac{\gamma_{т}}{\gamma} \right)^2 \cdot \frac{w^{1.5}}{1 - (w_0/w)^2} \cdot \frac{\Delta P_c}{\Delta P_p}$$

Для проверки (32) был проведен следующий эксперимент. На промежуточную решетку с известным числом отверстий набирался слой определенной высоты. Затем печь включалась в работу. В течение опыта, продолжавшегося от 24 до 240 часов, параметры газового потока и сопротивление системы поддерживались постоянными. В процессе работы решетки часть отверстий «захлебывалась», перекрывалась материалом сверху, и устанавливалось живое сечение, которое принималось за максимально допустимое при условиях эксперимента. Анализ экспериментов показал, что существует две области зависимости  $f = \varphi(z)$ . До  $z=5000$ , что соответствует отношению  $\Delta P_c / \Delta P_p \approx 0,7$ , зависимость (32) справедлива, то есть с увеличением относительного сопротивления слоя необходимо уменьшение живого сечения. При  $z > 5000$  опытные данные резко отклоняются от теоретической зависимости (32) и могут быть описаны эмпирической формулой

$$\frac{1}{f^{0.4}} = \frac{49}{z \cdot 10^{-3} + 65} \quad (33)$$

Из (33) следует, что при дальнейшем росте относительного сопротивления слоя допустимо увеличение живого сечения решетки, то есть решетка постепенно теряет функцию распределителя и становится поддерживающим слоем устройством.

По зависимостям (32) и (33) можно определить оптимальное живое сечение решетки. В частности, для условий печи Макеевского завода  $f=3,5\%$ .

#### 4. Исследование переточных устройств

Передача сыпучего материала из зоны меньшего давления в зону с большим давлением требует применения дополнительного энергоносителя либо организации запорных устройств для прекращения перетока газов. В соответствии с этим, к исследованию и освоению было принято два типа переточных устройств: инжекционное и с плотным фильтрующим слоем.

Установленное на промышленной печи инжекционное переточное устройство состояло из диффузора с углом раскрытия

10°, смесительной камеры длиной 6Д, в начале которой прорезаны 4 окна 60×115 мм. Диаметр сопла составлял 19, 29, 34 и 40 мм. В ходе экспериментов сопротивление решетки изменялось в пределах 1,5—10,8 кН/м<sup>2</sup>, расход воздуха с давлением ~ 3 бар составил от 499 до 2304 нм<sup>3</sup>/час. При умеренных сопротивлениях решетки (до 3000—4000 н/м<sup>3</sup>) коэффициент инжекции составил 10—12, что совпадает с данными М. С. Зака. Инжектор показал устойчивую работу при стационарном режиме, но требовал повышенного расхода энергии (стоимость энергозатрат на переток в многозонной печи оценивается в ~10% стоимости передела). По этой причине инжекционный переток может быть рекомендован только для тех случаев, когда нельзя его заменить более дешевым.

Физической сущностью работы переточного устройства с фильтрующим слоем материала, выходящего из нижней части устройства через калиброванное отверстие (шайбу, клапан и т. д.), является истечение сыпучих в противотоке газа. Аналитическое рассмотрение этого явления привело к зависимости

$$\left(\frac{U}{U_0}\right)^2 = 1 - \left(\frac{W_{\text{отв}}}{W_{\text{кр}}}\right)^{2-n}, \quad (34)$$

где  $W_{\text{кр}}$  — критическая скорость газа в отверстии, при которой прекращается истечение.

Для проверки уравнения (34) был поставлен эксперимент по истечению сыпучих в противотоке газа. Рабочей частью модели служили трубы 15,9×15,9; 17,5×17,5 и 31,5×31,5 мм с калиброванным отверстием или соплом в нижней части. В качестве сыпучего материала использовался известняк фракции 0,45—0,8; 0,8—1,25; 1,26—1,6 мм, песок 0,05—0,4; 0,8—1,25 мм, шамотная глина 0,45—0,8 мм, железные кварциты 0,45—0,8 мм, пшено с  $d_{\text{экв.}} = 2,025$  мм. Высота слоев в трубах изменялась от 145 до 375 мм. Эксперимент показал, что скорость истечения не зависит от высоты слоя, формы и длины сопла и его шероховатости, а определяется только скоростью газов в выходном отверстии, что подтверждает правильность вывода (34) — рис. 5.

Для расчета критической скорости получены уравнения

$$\text{при } 10 < Ar < 10^5 \quad Re_{\text{кр}} = 0,0038 Ar^{0,95} \quad (35)$$

$$\text{при } 10^5 < Ar < 10^7 \quad Re_{\text{кр}} = 0,16 Ar^{0,63} \quad (36)$$

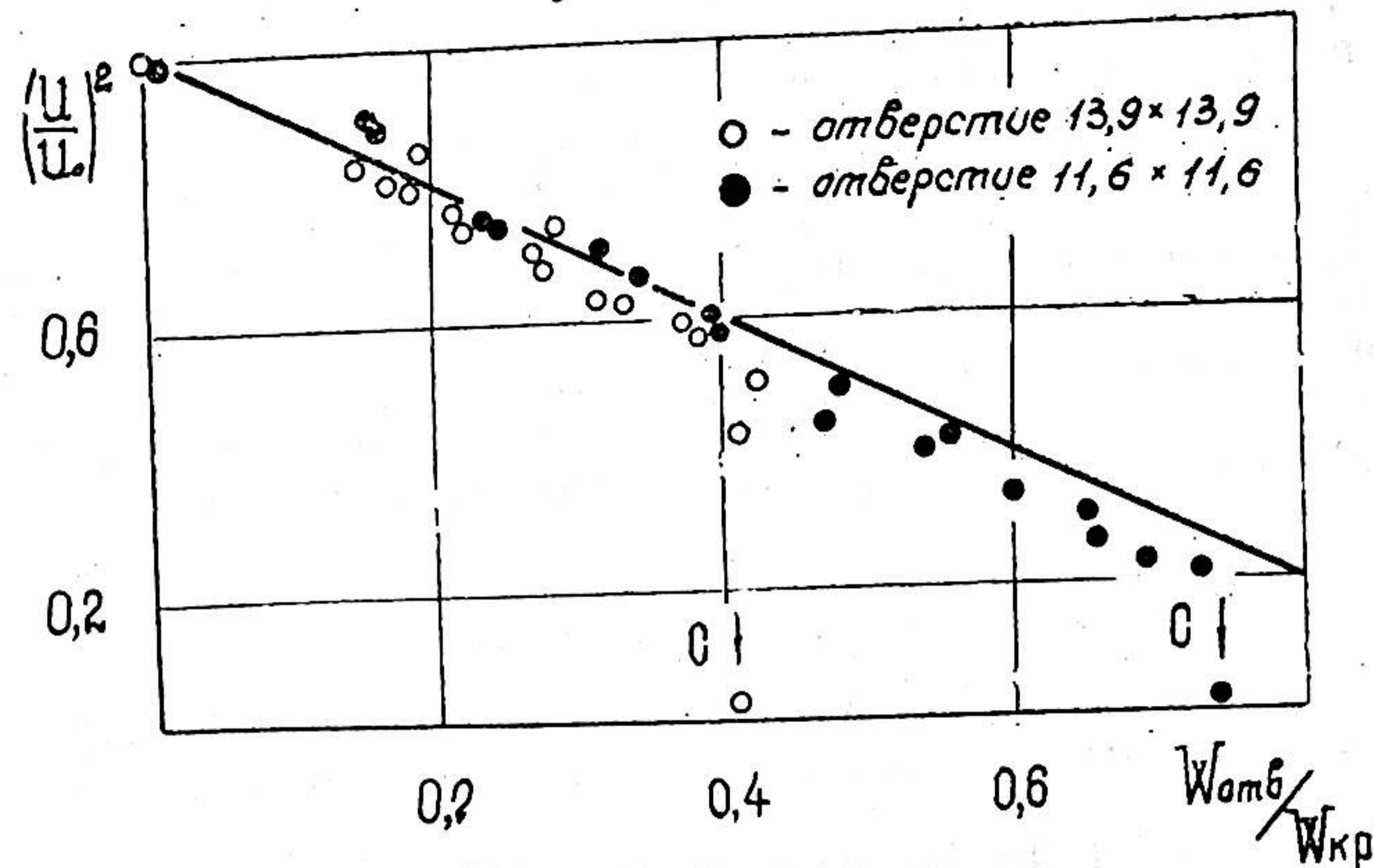


Рис. 5. Сопоставление расчетной по формуле (34) и опытной относительной скорости истечения. Труба 31,5×31,5 мм. Известняк  $d_{\text{ср}} = 0,625$  мм. Точка С — прекращение истечения

Для расчета скорости истечения сыпучих  $U$  необходимо определить  $W$  по величине сопротивления, приложенного к переточному устройству. Используя формулу сопротивления фильтрующего слоя М. Лева, получили зависимость для расчета производительности переточного устройства с плотным слоем

$$U + W_{\text{кр}} \left[ 1 + \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2-n}} = C \cdot \Delta P^{\frac{1}{2-n}} \quad (37)$$

Проверка зависимости (37) производилась на плексигласовой модели двухзонной печи в 1/14 натуральной величины и промышленной печи диаметром 2750 мм. Данные испытаний с точностью ±10% подтвердили зависимость (37).

На основе данных выполненного исследования нами разработана конструкция наружного переточного устройства с фильтрующим слоем и регулирующим клапаном. Устройство смонтировано на печи, отработано и сдано в промышленную эксплуатацию.

Оборудование клапанного переточного устройства с филь-

трующим слоем дополнительным инжектором после клапана интенсифицировало его работу. При этом необходим дутьевой воздух низкого давления ( $\sim 0,2$  бар); коэффициент инжекции достиг 30—40 кг/кг. Такое комбинированное устройство, защищенное авторским свидетельством\*, успешно прошло промышленное испытание. Инжекторами низкого давления оборудованы на макеевской печи клапанные переточные устройства. Клапанные переточные устройства рекомендуются к использованию на многозонных печах кипящего слоя в том случае, если материал допускает транспорт в плотном слое.

## РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

#### 1. Восстановление железных руд

*Энергетическая оптимизация восстановительного цикла и идеальный цикл.* Наиболее энергоемким процессом эндотермической переработки сыпучих материалов является восстановление железных руд, представленное в современной технике доменным производством. При переходе к прямому получению железа в агрегатах с кипящим слоем положение усложняется низкой степенью использования газа в слое. Для достижения минимальных расходов газа-восстановителя необходимо повторное его использование, то есть создание круговых, циклических процессов.

Теорией циклов является по существу техническая термодинамика. Ее методологической основой является теоретически найденный абстрактный идеальный цикл и разработка методов приближения к нему реальных циклов.

Нашим рабочим телом (термодинамической системой) является циркулирующая смесь газа-восстановителя и окислителя. Количеством воздействия системы (величиной полезной субстанции, переходящей ее границы) является количество газа-восстановителя  $dV$ . Практически удобно начислять его в

объемных единицах, так как независимо от рода восстановителя (водорода, окиси углерода или их смеси) стехиометрический объем на единицу восстановленного продукта остается неизменным —  $600 \text{ м}^3/\text{т Fe}$ . Потенциалом системы должна быть интенсивная величина, характеризующая способность системы быть восстановителем и отвечающая условию абсолютности потенциала, то есть пропорциональности количеству воздействия. Для рассматриваемой системы потенциалом является объемная концентрация газа-восстановителя  $P$ . Для процесса восстановления сумма приведенных количеств газа-восстановителя равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{P_i} = 0 \quad (38)$$

Отсюда, при использовании метода Клаузиуса, показано, что интеграл по замкнутому контуру восстановительной системы также равен нулю

$$\oint \frac{dV}{P} = 0 \quad (39)$$

То есть подынтегральное выражение является функцией состояния системы, названной нами *субтропией* (аналог энтропии для тепловых систем):

$$S_1 = S_0 + \int_0^1 \frac{dV}{P} \quad (40)$$

Субтропия обладает свойством аддитивности, что при анализе круговых процессов позволяет принимать величину аддитивной составляющей  $S_0$  равной нулю. Практически удобно пользоваться величиной удельной субтропии, отнесенной, например, к 1 т восстановленного железа. Тогда численно величина удельной субтропии характеризует суммарное количество газов (восстановителя и окислителя), приходящихся на 1 т Fe. Субтропия  $S$  является обобщенной координатой восстановительной системы.

При известном потенциале системы  $P$  и координате  $S$  можно сформулировать идеальный цикл. В диссертации дается формулировка идеального восстановительного цикла (цикла Карно для восстановительной системы):

вывод из системы газа-восстановителя (то есть процесс восстановления окислов железа) и ввод его в систему

\* В. М. Дементьев, Ю. П. Нехлебаев, Г. М. Максименко, М. С. Шкляр. Переточное устройство для многозонной печи кипящего слоя А. с., приоритет от 18 апреля 1966 г.

после восстановления производится изопотенциально при  $P = \text{const}$  на максимальном (минимальном) концентрационном уровне; переход изопотенциальных уровней производится без изменения суммарного объема газов, то есть изосубтропийно при  $S = \text{const}$ .

На рис. 6 в  $PS$ -координатах представлен идеальный восстановительный цикл. По построению он подобен обратному

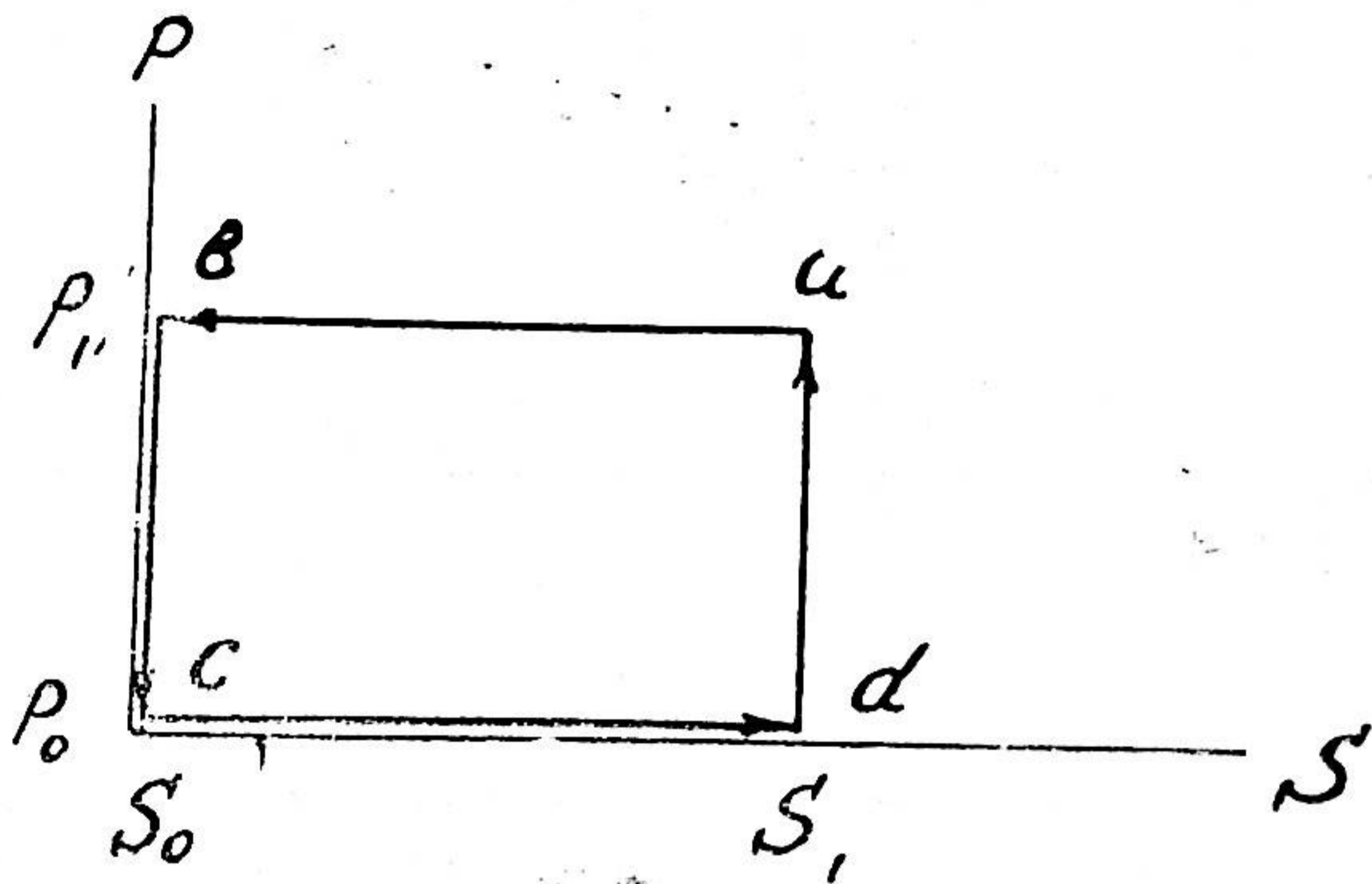


Рис. 6.  $PS$ -диаграмма идеального восстановительного цикла

(холодильному) циклу Карно, так как количество воздействия  $dV$  выводится из системы (газ поступает на восстановление) при максимальном значении потенциала  $P_1$  и возвращается в систему при минимальном —  $P_0$ .

К.п.д. использования газа-восстановителя такого цикла равен

$$\eta_m = 1 - \frac{P_0}{P_1} \quad (41)$$

В работе показано, что постулат Томсона о равенстве минимального потенциала системы потенциалу окружающей среды распространяем на восстановительную систему, тогда  $\eta_m^{\text{max}} = 1$ .

Таким образом, техническая термодинамика восстановительного цикла утверждает возможность достижения  $\eta_m = 1$ , то есть полного усвоения газа-восстановителя.

Идеальный процесс восстановителя при  $P = \text{const}$  осуществить нельзя, как нельзя осуществить процессы расширения или сжатия при  $T = \text{const}$ , предусматриваемые в тепловом цикле Карно. Выходом из положения, как и в энергетике, является организация ступенчатых процессов с восстановлением потенциала до начального уровня на каждой ступени. Методами восстановления потенциала исследуемой системы является отмывка или регенерация окислителей. Применением одного из этих методов характеризуется тип реального цикла, приближающегося к идеальному.

Цикл с промежуточной отмывкой характеризуется чередованием процессов восстановления при  $S = \text{const}$  и отмывки при  $V = \text{const}$ , в пределе получается процесс при  $P_1 = \text{const}$  и  $dS < 0$ .

Цикл с промежуточной регенерацией характеризуется чередованием процессов восстановления при  $S = \text{const}$  и регенерации до  $P = P_1$ . В пределе при совмещении восстановления и регенерации процесс идет при  $P_1 = \text{const}$  и  $dS > 0$ .

В диссертации рассмотрены примеры обоих циклов, проанализированы с помощью разработанных  $PS$ -диаграмм. На рис. 7 представлена  $PS$ -диаграмма восстановительного цикла с промежуточной 5-ступенчатой отмывкой.

Координатная сетка процессов отмывки и регенерации на масштабной  $PS$ -диаграмме позволяет графически определить оптимальные условия организации цикла без громоздких расчетов.

Использование  $PS$ -диаграмм в металлургии аналогично  $TS$ -диаграммам в теплотехнике значительно упрощает расчет и анализ циклов.

В диссертации дается сравнительная оценка циклов с промежуточной отмывкой и промежуточной регенерацией. Показано, что цикл с промежуточной отмывкой целесообразен при высоком давлении системы и наличии стороннего источника тепла (например, атомного реактора) для регенерации газа в отдельном аппарате. Цикл с совмещенной регенерацией дает больший эффект при низком давлении и использовании органического топлива.

Для реализации рассмотренных возможностей создания реальных циклов, близких к идеальному, необходимо создание агрегата, позволяющего организовать многоступенчатый процесс восстановления с точным регулированием атмосферы, температуры, давления и других параметров на каждой ступени восстановления. Весьма полно этим требованиям отве-



чает многосекционный восстановительный агрегат с кипящим слоем.

В диссертации представлена разработанная схема атомно-металлургического завода с использованием восстановительного агрегата с кипящим слоем. В основу положен цикл с промежуточной отмывкой, представленной на рис. 7. Показано, что использование газа-восстановителя достигает  $\eta_m = 0,95$ , и потребуется дополнительное тепло атомного реактора в количестве  $1,16 \times 10^6$  ккал/т губки.

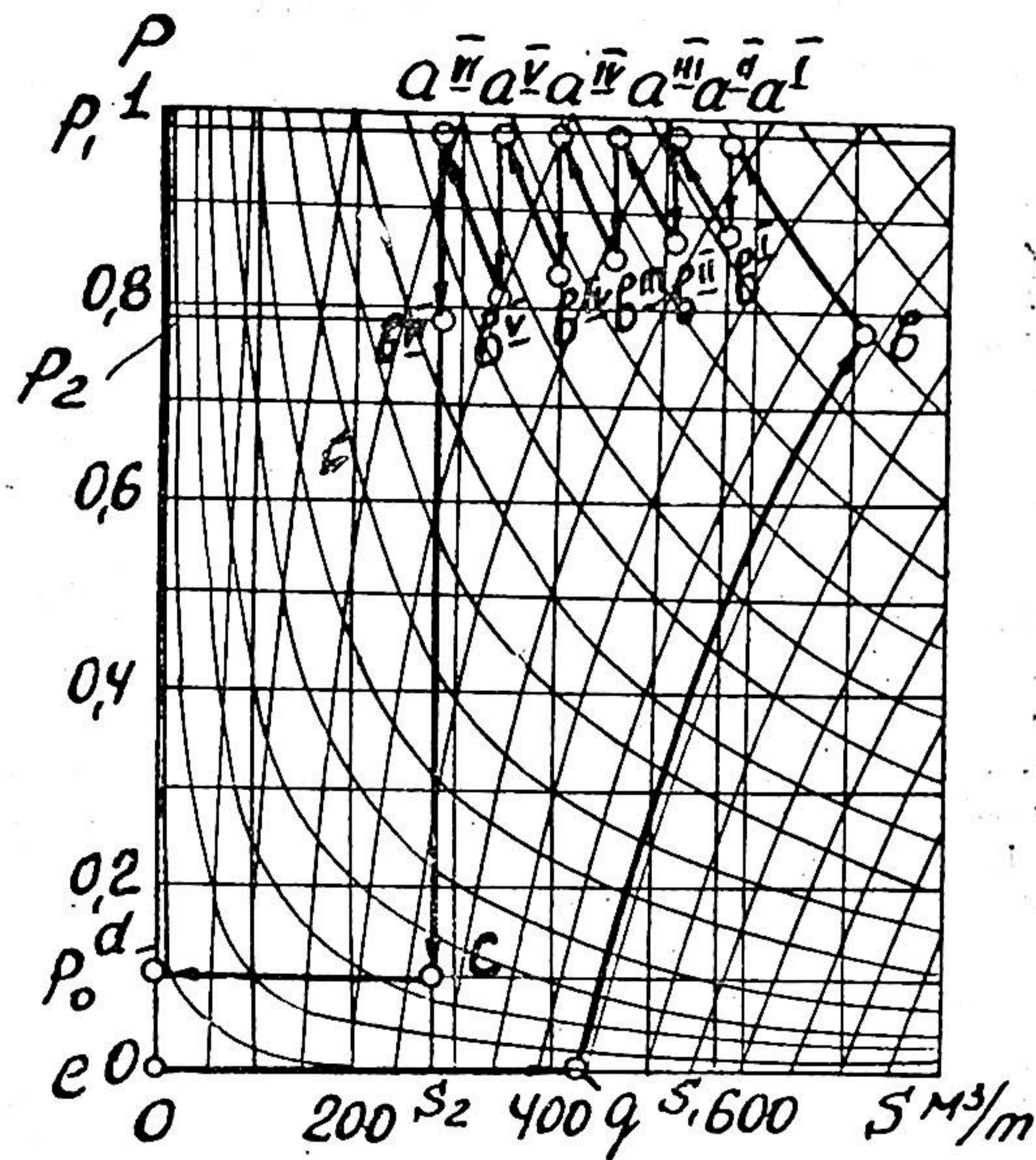


Рис. 7. PS — диаграмма восстановительного цикла с промежуточной отмывкой. Процессы aI — VII — восстановления до Fe, bI — VII — отмывки CO<sub>2</sub>, bIV — c — восстановления гематита, cd — вывод из системы, oq — возврат CO<sub>2</sub> в систему, qv — регенерации CO<sub>2</sub>.

Аэродинамическая устойчивость кипящего слоя восстановленных частиц является основным фактором технологической стабильности процесса прямого получения железа в кипящем слое. Анализ явления показал, что основным условием стабильности является выбор температуры процесса в зависимости от размера восстанавливаемых частиц.

Обработка данных известных процессов (H-iron, Nu-iron, Esso-R-L, Новальфер, ИГ АН УССР, ИМЕТ АН СССР, Футакучи и др.) дала зависимость

$$T = 700 + 1,8 \cdot 10^4 \cdot d^{2/3}, \text{ } ^\circ\text{K} \quad (42)$$

Из общей зависимости (42) выпадают точки процессов Шенка, Танака и Футакучи, где для стабилизации слоя применялись инертные материалы: кокс, известняк, железистый песок.

В работе показано, что критерий Дерягина для процесса восстановления имеет условный смысл, не является безразмерным и запишется в виде  $De_* = d^2 \gamma_T / \Delta T^3$ . Тогда допустимая степень металлизации по условиям аэродинамической устойчивости слоя будет равна

$$\eta_m = B [De_*^{0,65} (m - 1)^n]^{0,05} \quad (43)$$

Зависимость (43) в работе номограммирована.

## 2. Обжиг железорудных материалов

*Упрочняющий обжиг окатышей.* Железорудные окатыши, производство которых за пятилетку возрастает в 4 раза, являются идеальным материалом для обработки в кипящем слое. Однако, как показали исследования истирания окатышей  $d = 15$  мм на установке диаметром 105 мм, сырые окатыши разрушаются в кипящем слое. К обработке пригодны окатыши, предварительно прокаленные в плотном слое при 600—800°C.

Эксперименты по обжигу в кипящем слое производились на установке 165×165 мм с предварительно упрочненными окатышами  $d = 5—12$  мм основностью 0 и 0,45 и  $d = 8—16$  мм основностью 0,95 и 1,2. Опыты велись в периодическом режиме порциями по 20—25 кг со временем изотермической выдержки 5, 10 и 20 мин. Скорость газового потока  $5 \pm 5,5$  м/сек, температура процесса 1160—1320°C.

Распределение окатышей по интервалам прочности подчинялось зависимости

$$R_* = 100e^{-bP^n}, \quad (44)$$

$$\text{где } n = \text{const} \cong 2,6, \quad b = f\left(t_{\text{обж.}}, \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)$$

Отсюда средняя прочность

$$\bar{P} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n} + 1\right)}{b^{1/n}}, \quad (45)$$

где  $\Gamma$  — гамма-функция.

Для оптимальных условий обжига  $\bar{P} = 280\text{—}320$  кг/окатыш. В диссертации приводятся результаты определения металлургических свойств окатышей: барабанная проба минимальна ( $\sim 1\%$ ), выход мелочи менее 5 мм по «Линдеру» в среднем в полтора раза меньше окатышей ССГОК и ЦГОК.

Произведен теплотехнический анализ комплексного агрегата решетка—печь кипящего слоя. Показано, что расход тепла на обжиг составит 150 000 ккал/т против 250 000 ккал/т на установке решетка—трубчатая печь по данным фирмы Kobe-Steel и 470 000 ккал/т на ленте ОК—5—108 по данным ЦГОК.

Широкие возможности кипящего слоя по точному регулированию температуры и атмосферы позволяют организовать безокислительный обжиг с получением магнетитовых окатышей, не разрушающихся при восстановлении. Такой режим обжига проверен в лабораторных условиях при обжиге в токе аргона с температурой 1150—1350°C и на опытной установке с кипящим слоем сечением 145×145 мм при обжиге в токе продуктов неполного горения природного газа при  $\alpha = 0,95\text{—}0,98$  и температуре 900—1330°C. Магнетитовые окатыши из суперконцентратов с  $\text{SiO}_2 = 0,2\%$  приобретали прочность 150—350 кг/окатыш. При восстановлении окатыши имели прочность 120—140 кг/окатыш, что в несколько раз больше прочности гематитовых окатышей. Разработанный метод упрочнения магнетитовых окатышей\* не требует применения шлаковых связок, что открывает новые возможности перед горно-рудной промышленностью.

Теплотехника магнетизирующего обжига руд. Освоение

\* В. М. Дементьев, В. Н. Школьников, С. М. Графман. «Способ обработки магнетитовых окатышей». А. с. № 272321, приоритет от 27 июня 1968 г.

методов сжигания газа в кипящем слое позволило приступить к созданию схемы с минимальными тепловыми затратами.

Были рассмотрены 16 схем магнетизирующего обжига отечественных институтов и зарубежных фирм. Их поэлементный анализ позволил установить оптимальные условия организации каждого процесса и разработать схему теплотехнически оптимальную в целом. Достигнуто минимальное количество обрабатываемых в системе газов, что обеспечивает минимальный расход топлива на уровне 3% для сухих руд, но приводит к частичному перевосстановлению руды (за счет использования неразбавленного газа-восстановителя) и требует организации ее окисления «до кондиции» в зоне охлаждения.

Для экспериментальной проверки этой технологической особенности была сооружена трехступенчатая установка из аппаратов сечения 230×230 мм. В первой ступени газ сжигался в кипящем слое  $\alpha \geq 1$  и происходил нагрев руды до температуры восстановления, во второй ступени происходило восстановление руды богатым газом из специального аппарата воздушной конверсии, в третьей зоне производилось охлаждение руды и окисление перевосстановленной. Испытания, проведенные на криворожских кварцитах фракции 0—4 мм с содержанием Fe общ. = 38,7%, показали большую гибкость схемы в установлении требуемых режимов в каждой ступени. Концентрат из обожженной руды содержал 65,5% железа при извлечении 82,1%.

### 3. Обжиг нерудных материалов

Обжиг извести. На основе разработок диссертанта и под его руководством запроектирован, построен и введен в промышленную эксплуатацию головной образец многозонной печи с кипящим слоем: трехзонная печь обжига известняка на Макеевском металлургическом заводе. Печь принята в эксплуатацию 10 мая 1968 года. Общий вид печи представлен на рис. 8. В диссертации излагается поэтапный (по зонам) метод освоения многозонной печи. За этот период удельная производительность зоны обжига повышена с 26,6 до 32,8 т/м<sup>2</sup>сут., а удельный расход топлива снижен с 556 до 205 кг усл/т.

Качество извести промышленной печи обжига в кипящем слое, благодаря автоматическому регулированию температуры зоны обжига с точностью  $\pm 10^\circ\text{C}$ , превосходит требования I сорта ГОСТа 9179—59: выход теста достигает 3—3,2 л/кг, а

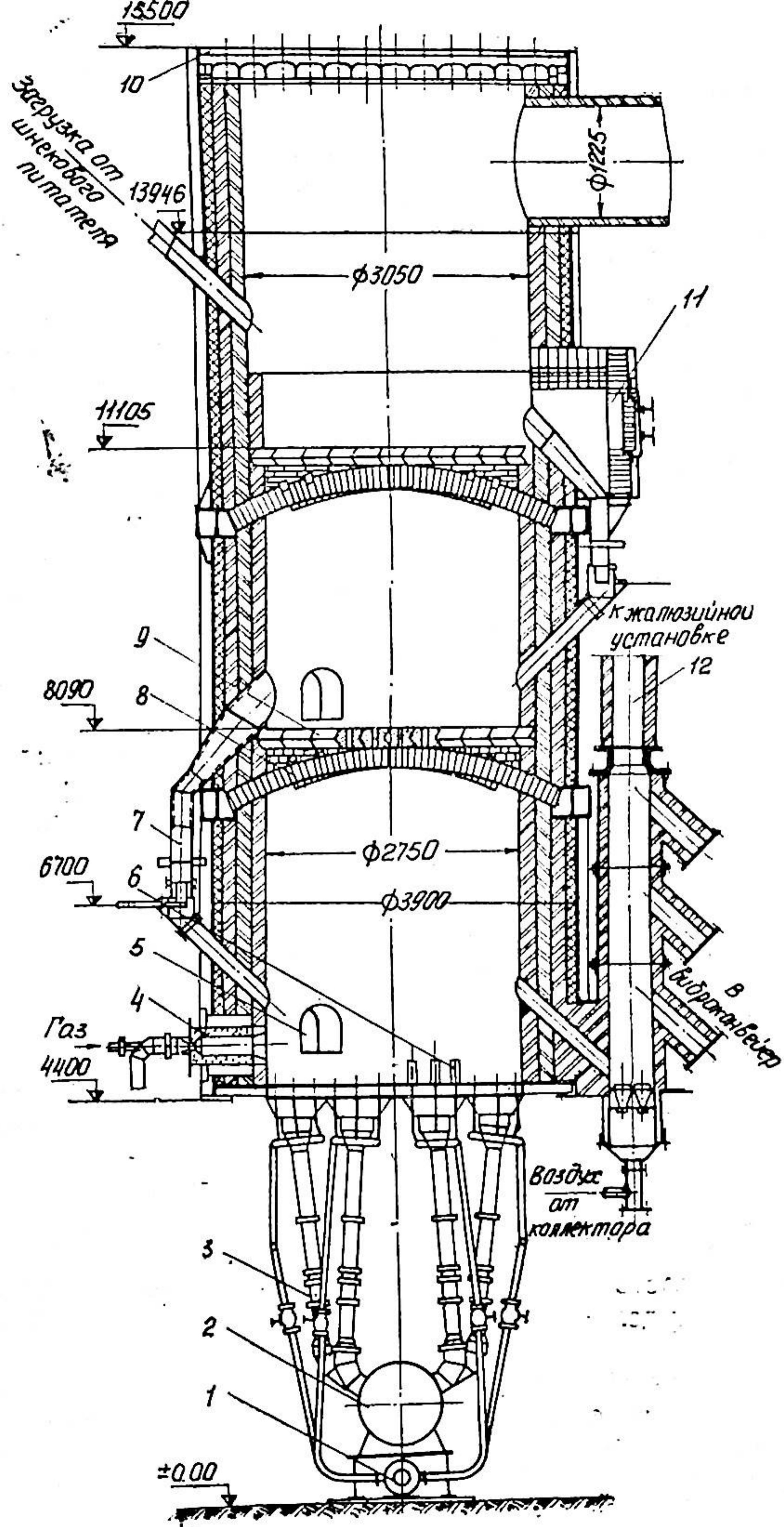


Рис. 8. Трехзонная печь обжига известняка в кипящем слое (после проведения исследовательских и пуско-наладочных работ): 1 — газовый коллектор; 2 — воздушный коллектор; 3 — труба для подвода воздуха; 4 — розжиговая горелка; 5 — лаз; 6 — лаз; 7 — горелка; 8 — переточное устройство; 9 — арка подины; 10 — подовый кирпич; 11 — свод печи; 12 — выгрузочный гидрозатвор.

время гашения снижается до 15—20 сек. Достигнута активность извести 95,5%.

Путем изменения температуры обжига получали известь с заданными технологическими свойствами. Такая известь дает в 1,4—1,5 раза больший технологический эффект в агломерационном и конвертерном производстве, чем известь машин ПОР или вращающихся печей.

**Обжиг шамота.** Освоение методов сжигания газа в кипящем слое позволило поставить исследование по высокотемпературному обжигу глин на шамот. Эксперименты проводились на опытной печи сечением 165×165 мм, оборудованной горелками типа «труба в трубе». Обжигались часоварские глины Ч-1 и Ч1-ПК, смеси Ч1-ПК и К-3, Ч-1 и К-1 и каолин В-2, с содержанием  $Al_2O_3$  в пределах 25,1—44,5%. Обжиг в кипящем слое протекал устойчиво при температурах 1120—1300°C. Получен шамот с водопоглощением от 1,5 до 8% в зависимости от состава глин и температуры обжига. Данные обобщены эмпирической формулой.

Определена зависимость предельной температуры обжига от допустимого количества жидкой фазы. Получено уравнение

$$T_{пр} = 1200 + 1,17[De^{0,65}(m - 1)^n Al]^{1,23} \quad (46)$$

По (15) и (16), (17) рассчитано влияние диффузии частиц на качество обжига шамота. Показано, что при высоте слоя зоны обжига один метр увеличение диаметра печи до 1,5—2,0 м практически снимает влияние проскока частиц. Выполнен теплотехнический анализ печи. Установлено, что для данного процесса оптимальной является трехзонная печь, а разделение зон подогрева и охлаждения на 4 секции приводит к уменьшению расхода топлива на 14,3%.

Работа завершена разработкой печи обжига глин на шамот производительностью 200 т/сутки. В конструкции печи учтено интересное свойство кипящего слоя размягченных частиц — коагулировать пыль. Предусмотрен возврат уноса из верхней зоны под зону обжига для его коагуляции. На этот способ коагуляции получены авторские свидетельства\*, \*\*.

**Обжиг других спекающихся материалов.** С использованием разработок диссертанта по сжиганию газа в кипящем

\* В. М. Дементьев, А. Н. Ванжа, Ю. П. Нехлебаев, Л. С. Болихова, Н. Т. Моисеенко. «Способ обжига измельченных материалов». А. с. № 305335, приоритет от 31 декабря 1968 г.

\*\* Дементьев В. М. и другие. Шахтная печь для обжига сыпучих материалов. А. с. № 358598, приоритет от 30 ноября 1970 г.

слое и при его консультативном участии успешно проведены эксперименты:

а) в Южгипроцементе по обжигу цементного клинкера в кипящем слое. Исследования завершены созданием агрегата для обжига клинкера в кипящем слое\*.

б) во ВНИИСтроме по обжигу вспучивающихся материалов в кипящем слое. Разработки заложены в проект промышленной печи обжига керамзитового песка

в) в Таллинском политехническом институте по обесфториванию оболочковых фосфоритов в кипящем слое. Совместная работа институтов НИУИФ, ТПИ, ЛенНИИгипрохима и ДонНИИчермет завершена созданием процесса\*\* и сооружением опытно-промышленной установки производительностью 12 т/сутки на Маардусском химкомбинате.

#### 4. Экономика и внедрение высокотемпературных процессов в кипящем слое

*Восстановление железных руд.* Импульсом к разработке диссертантом основ технической термодинамики восстановительного цикла явилась постановка проблемы использования атомной энергии в черной металлургии и, в частности, для прямого получения железа в кипящем слое. В настоящее время решается вопрос, по какому пути пойдет развитие схем атомно-металлургических комплексов — изопотенциальному или противоточному. Современная металлургия, имеющая разомкнутые газовые схемы, считает идеалом противоточную схему восстановительного агрегата. Стремление к минимальному расходу органического топлива при использовании атомной энергии порождает необходимость создания замкнутых газовых схем, газовых циклов. На циклических процессах базируется современная теплоэнергетика, развивающаяся по изопотенциальному пути, предсказанному еще Сади Карно.

В диссертации приводится сравнение разработанной схемы атомно-металлургического завода с использованием агрегата с кипящим слоем по изопотенциальной схеме, построен-

\* Г. С. Вальберг, Ю. А. Бурковский, В. М. Дементьев, Л. С. Левитова, Е. С. Лидерман, К. Т. Пяткина. «Установка для производства цементного клинкера», а. с. № 254373, приоритет от 14 декабря 1966 г.

\*\* С. И. Вольфович, М. А. Вейдерма, В. М. Дементьев, М. Ш. Исламов, Р. О. Куузик, Г. Н. Ягодина. «Способ обесфторивания природных фосфатов», а. с. № 1376321, приоритет от 23 ноября 1969 г.

ной с учетом рекомендаций технической термодинамики восстановительного цикла, со схемой такого же завода проф. Антониоли, использующего агрегат с кипящим слоем по противоточной схеме. Показано, что в изопотенциальной схеме удельное количество циркулирующего газа снижается до 709 м<sup>3</sup>/т против 1835 м<sup>3</sup>/т в противоточной схеме, расход топлива сокращается на 22% и общие энергозатраты — на 14%.

Изопотенциальный путь развития более прогрессивен.

В диссертации приводится сравнение показателей разработанной схемы с современными и перспективными (при возврате после отмывки СО<sub>2</sub> колошникового газа и кислородном дутье) данными доменного производства. Показано, что стоимость энергозатрат снизится в 4,3 раза по сравнению с современным состоянием и в 2,4 раза — перспективным развитием доменного производства. Реализация этих возможностей требует широкой организации научно-исследовательских работ и при современном состоянии этого вопроса ожидается к концу 70-х годов.

С участием диссертанта проведены пуско-наладочные работы на установке прямого получения железа в кипящем слое на заводе Запорожсталь, построенной по разработкам ИГ АН УССР. Опытные пуски, проведенные совместно с бригадой ИГ АН УССР под руководством чл.-корр. АН УССР Махорина К. Е., показали принципиальную работоспособность агрегата и выявили ряд недостатков, требующих некоторой реконструкции агрегата. В проект реконструкции закладываются разработки диссертанта по отдельным элементам печи (переточным устройствам, керамическим решеткам) и методам предотвращения слипаемости восстановительного материала.

*Обжиг железорудных материалов.* Под руководством диссертанта выполнены проектные соображения по дооборудованию конвейерной машины ОК-5-108 агрегатами кипящего слоя для дообжига и охлаждения окатышей.

В диссертации приведены результаты такой проработки для условий ЦГОК'а и показано, что производительность ленты повышается в 1,5 раза. Условный экономический эффект из расчета на одну ленту составляет 688,5 тыс. руб., окупаемость мероприятия — 1,3 года. Вопрос реконструкции ленты ОК-5-108 находится в стадии решения соответствующими инстанциями.

В диссертации приводятся результаты технико-экономического сравнения разработанной теплотехнически оптимальной

схемы магнетизирующего обжига руд с другими схемами. Показано, что себестоимость обжига криворожских окисленных кварцитов может быть снижена до 1 рубля, что является экономической предпосылкой конкурентоспособности обжига магнитного метода обогащения железных руд.

*Обжиг нерудных материалов.* Как отмечалось выше, трехзонная печь обжига известняка в кипящем слое производительностью 200 т/сутки сдана в промышленную эксплуатацию 10 мая 1968 г. Макеевскому металлургическому заводу. По итогам работы печи за 1969 год экономический эффект оценен заводом в 366 154 руб.

Сравнение результатов работы печи с показателями известеобжигательных агрегатов заводов черной металлургии УССР (было обследовано 50 агрегатов общей производительностью 2,4 млн. тонн в год) показало конкурентоспособность печи кипящего слоя по сравнению с обжиговыми машинами ПОР; ОНР, БЦРМ, шахтными и вращающимися печами.

Под руководством диссертанта на основе изложенных выше исследований и анализа опыта эксплуатации печи Макеевского завода разработано техническое задание на проектирование четырехзонной печи обжига известняка фракции 3—12 мм в кипящем слое с активной площадью пода 12 м<sup>2</sup> и производительностью 400 т/сутки. Рабочий проект печи выполнен институтом Гипросталь. Печь ДонНИИчермета — Гипростали принята рядом организаций к проектированию для КРПК, ЮГОКа, Азовстали, Братского лесопромышленного комбината, Броценского цементного завода, Березниковского химкомбината и других предприятий. Всего проектируется 35 печей общей производительностью 4,24 млн. тонн в год с потенциальным экономическим эффектом 21,8 млн. рублей. Наряду с проектированием новых агрегатов проработан вопрос реконструкции типовой шахтной известеобжигательной печи Гипрострома производительностью 200 т/сутки на печь кипящего слоя. Ожидаемая производительность после реконструкции при исходной фракции известняка 10—25 мм составила 400 т/сутки. Предложения приняты заводом «Азовсталь» для реконструкции одной из печей известеобжигательного цеха.

Выполнено технико-экономическое обоснование (ТЭО) установки печи обжига шамота в кипящем слое на примере Велико-Анадольского шамотного завода, где вращающиеся печи условно заменены печами кипящего слоя. Показано, что

себестоимость обжигового передела снижается на 29,5%, а капитальные затраты на 31,6%. Условный экономический эффект для условий завода оценен в 486 тыс. рублей. Материалы по обжигу шамота представлены тресту Огнеупорнеруд и Главогнеупору МЧМ СССР. Принято решение о сооружении печи производительностью 200 т/сутки на Кондратьевском огнеупорном заводе.

*Другие спекающиеся материалы.* Среди других работ по обжигу спекающихся материалов, выполненных с участием автора и внедряемых в промышленность, можно отметить:

а) сооружение на Маардусском химкомбинате (Эстонская ССР) печи обесфторивания фосфатов в кипящем слое производительностью 12 т/сутки, пуско-наладочные работы начаты в 1972 г.;

б) опытно-промышленное освоение печи в кипящем слое для получения керамзитового песка производительностью 5000 м<sup>3</sup> в год; печь начала выдавать продукцию в 1971 году.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены исследования автора по тепловым и аэродинамическим вопросам организации высокотемпературных эндотермических процессов в кипящем слое.

Рассмотрены условия организации гетерогенных процессов в кипящем слое, показано наличие балансной и кинетической областей.

Установлено, что в балансной области ограничивающим фактором является аэродинамическая форсировка слоя. Рассмотрены уравнения аэродинамики кипящего слоя и решены совместно с уравнением теплового (материального) баланса слоя. Получено в критериальной форме уравнение удельной производительности процесса в балансной области, обобщающее известные автору данные по процессам в кипящем слое.

Рассмотрены условия организации процесса в кинетической области. Получено критериальное уравнение удельной производительности в этой области с учетом функции распределения частиц во времени. Ввод этой функции позволил обобщить данные лабораторного и промышленного эксперимента одним уравнением.

Совместное решение уравнений удельной производитель-

ности в балансной и кинетической областях позволяет рассчитать параметры процесса и найти их оптимальное сочетание.

Определены условия аэродинамической устойчивости кипящего слоя слипающихся частиц и получено уравнение для расчета допустимого количества жидкой (склеивающей) фазы в зависимости от свойств системы и аэродинамической форсировки слоя.

Кипящий слой рассмотрен как теплообменник смешивающего, противоточного типов и с перекрестным током. Разработан графоаналитический метод теплового расчета многозонных печей кипящего слоя различного технологического назначения. Изложен метод поиска оптимального количества зон многозонной печи.

Разработаны, исследованы на опытной установке и освоены на промышленной печи горелочные устройства для сжигания природного газа в кипящем слое. Показано, что при обжиге природных, как правило, спекающихся материалов, приемлема диффузионная горелка типа «труба в трубе». Даются формулы для расчета эпюры температур по высоте кипящего слоя.

На промышленной печи испытаны промежуточные решетки из жаропрочной стали и шамотных блоков. Решетка из шамотных блоков выдержала длительное испытание и освоена в промышленных установках. Рассмотрены аэродинамические условия работы решетки и даны зависимости для расчета ее оптимального сечения.

На промышленной печи испытаны переточные устройства инжекционного типа и с плотным слоем. В эксплуатацию введены переточные устройства с плотным слоем и регулирующим клапаном. На основе аналитических и экспериментальных исследований истечения сыпучих материалов в противотоке газа дана методика их расчета.

Показано, что создание конкурентоспособных агрегатов прямого получения железа в кипящем слое из-за низких степеней использования газа требует организации замкнутых газовых систем, газовых циклов. Циркулирующая смесь газов (восстановителя и окислителя) рассмотрена с позиций технической термодинамики. Сформулирован идеальный восстановительный цикл (цикл Карно для восстановительной системы). Показано, что основным условием идеализации является изопотенциальное восстановление.

Рассмотрены два типа реальных циклов (с промежуточной отмывкой или регенерацией окислителей), близких к иде-

альному. Произведен их сопоставительный анализ, в том числе и с помощью PS-диаграмм.

Разработана схема атомно-металлургического завода с использованием восстановительного агрегата с кипящим слоем по изопотенциальной схеме и сравнена со схемой аналогичного завода проф. Антониоли, использующей реактор с кипящим слоем по противоточной схеме. Показаны преимущества изопотенциальной схемы.

Исследован процесс обжига в кипящем слое железорудных окатышей размером 5—15 мм основностью от нуля до 1,2. Получены окатыши со средней прочностью 280—320 кг/окатыш. Разработана комбинированная схема обжига решетка—кипящий слой, имеющая высокие технико-экономические показатели.

На основе анализа 16-ти схем магнетизирующего обжига разработана и экспериментально проверена теплотехнически оптимальная схема обжига, имеющая минимальный расход топлива в 3% при высоком качестве обжига руды.

Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность обжига спекающихся материалов в кипящем слое. Работы по обжигу глины на шамот завершены разработкой печи производительностью 200 т/сутки. Печь принята к сооружению на Кондратьевском огнеупорном заводе.

Под руководством автора разработан, освоен и сдан в промышленную эксплуатацию Макеевскому металлургическому заводу головной образец трехзонной печи обжига известняка в кипящем слое производительностью 200 т/сутки. Качество извести превосходит требования первого сорта современных ГОСТов. Экономический эффект по итогам работы за 1969 г. оценен заводом в 366 154 рубля.

Разработано техническое задание на проектирование печи обжига известняка производительностью 400 т/сутки. Рабочий проект печи выполнен институтом Гипросталь. Печь принята рядом проектных организаций к установке на предприятиях металлургической, химической промышленности и промышленности строительных материалов. Проектируется 35 печей общей годовой производительностью 4,24 млн. т с потенциальным экономическим эффектом 21,5 млн. рублей.

Разработки автора использованы также при сооружении опытной печи кипящего слоя для обезфторивания фосфатов на Маардусском химкомбинате, печи производства керамзитового песка и учтены в проекте реконструкции реактора прямого получения железа в кипящем слое на заводе «Запорожсталь».

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$d$  — размер частиц,  $m$ ;  $\gamma_t, \gamma$  — удельная масса твердых частиц, газа,  $kg/m^3$ ;  $W$  — скорость газа,  $m/сек$ ;  $m$  — число псевдооживления,  $b/p$ ;  $\varepsilon$  — порозность слоя,  $b/p$ ;  $G$  — удельная производительность,  $kg/m^2 час$ ;  $q$  — удельный расход тепла,  $дж/кг$ ;  $\Delta i$  — полезное изменение энтальпии,  $дж/м^3$ ;  $\nu$  — вязкость газа,  $m^2/сек$ ;  $\tau$  — время,  $час$ ;  $h$  — высота слоя,  $m$ ;  $R, r$  — наружный, текущий радиус частицы,  $\lambda$  — теплопроводность,  $дж/м^2 час^\circ C$ ;  $\sigma$  — степень обработки материала,  $b/p$ ;  $\sigma_{ж}$  — поверхностное натяжение жидкости,  $кг/м$ ;  $q_0$  — удельное количество склеивающей жидкой фазы,  $кг/кг$ ;  $\Delta P_c, \Delta P_p$  — сопротивление слоя, решетки,  $n/m^2$ ;  $i$  — число секций;  $V/G$  — удельный расход газа (топлива),  $нм^3/кг$ ;  $c_1, c_2, c_3, c_4$  — удельная теплоемкость известняка, продуктов горения, воздуха, извести,  $дж/кг^\circ C$ ;  $\eta_{oc}$  — коэффициент потерь в окружающую среду;  $b/p$ ;  $k$  — удельный выход дыма,  $нм^3/нм^3$ ,  $L_0$  — теоретический расход воздуха на горение,  $нм^3/нм^3$ ;  $Q_p$  — калорийность топлива,  $дж/нм^3$ ;  $t_o, t_n, t_m$  — температура зон обжига, подогрева и охлаждения,  $^\circ C$ ;  $\xi$  — кратность рециркуляции,  $b/p$ ;  $n, m$  — количество зон подогрева, охлаждения;  $U(\alpha)$  — скорость нормального распространения пламени при данном коэффициенте избытка воздуха,  $нм/сек$ ;  $T, T_{ч}, T_{нач}$  — температура воспламенения частиц, начальная газовоздушной смеси,  $^\circ K$ ;  $f$  — живое сечение решетки,  $\%$ ;  $U, U_0$  — скорости истечения сыпучих в противотоке газа, свободное,  $m/сек$ ;  $dV$  — количество воздействия,  $нм^3/т$ ;  $P$  — потенциал системы (объемная концентрация восстановителя),  $\%$ ;  $S$  — субтропия (удельная субтропия),  $нм^3/т$ ;  $\eta_m$  — степень использования газа-восстановителя,  $b/p$ ;  $\eta_m$  — степень металлизации,  $b/p$ ;  $Al$  — содержание ( $Al_2O_3 \pm TiO_2$ ),  $\%$ ; Критерии  $Ar$  — Архимеда,  $Re$  — Рейнольдса,  $M$  — удельной производительности процесса в балансной области,  $L$  — удельной производительности эндотермического процесса в кинетической области,  $Nu$  — Нуссельта;  $Pe$  — Пекле,  $De$  — Дерягина,  $Fr$  — Фруда.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ АВТОРА

### I. Монографии

1. Дементьев В. М. Тепловые расчеты многозонных печей с кипящим слоем. Изд. Metallurgia, 1971 г.

### II. Статьи

2. Дементьев В. М. Вопросы аэродинамики кипящего слоя. Теплоэнергетика № 1, 1959 г.

3. Дементьев В. М. К расчету многозонной печи обжига известняка в кипящем слое. Инженерно-физический журнал. Том II, № 12, 1959 г.

4. Дементьев В. М., Котровский М. М., Нехлебаев Ю. П. Обжиг известняка в кипящем слое. Metallurg, № 6, 1960 г.

5. Дементьев В. М. Обжиг известняка в кипящем слое для аглофабрик металлургических заводов (информационное сообщение). Донецкое отделение НТО черной металлургии, 1960 г.

6. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П. Исследование процесса обжига известняка в псевдооживленном слое. Химическая промышленность, № 4, 1961 г.

7. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П. Исследование качества извести, получаемой в кипящем слое. Строительные материалы, № 12, 1962 г.

8. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Шкляр М. С. Обжиг известняка в печи кипящего слоя. Строительные материалы, № 7, 1964 г.

9. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Тищенко А. Т., Хвастухин Ю. И., Иванов Г. А. Беспламенное сжигание газа в печи кипящего слоя. Газовая промышленность, № 6, 1965 г.

10. Дементьев В. М. Обжиг известняка в кипящем слое. Бюллетень ЦНИИТЭСТРОМ, вып. 7, 1965 г.

11. Дементьев В. М. Обжиг известняка в кипящем слое на Макеевском металлургическом заводе им. Кирова. Сб. Применение кипящего слоя в народном хозяйстве СССР. ЦИИИ ЦМ, 1965 г.

12. Канфер В. Д., Кривошеев В. Н., Хлапонин Н. С., Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Ефанова Н. И. Зависимость качества извести от режимов обжига в печи кипящего слоя. Труды ДонНИИЧермета, вып. 3. «Металлургия чугуна», 1966 г., 30.

13. Дементьев В. М. Методика теплового расчета многозонной печи эндотермического обжига в кипящем слое. Инженерно-физический журнал, том XI, № 6, 1966 г.

14. Дементьев В. М. Проблемы промышленного внедрения высокотемпературных эндотермических процессов в кипящем слое. Сб. Высокотемпературных эндотермических процессов в кипящем слое.

ратурные эндотермические процессы в кипящем слое. «Металлургия», 1968 г. 13—22.

15. Дементьев В. М., Граховский Б. М. Некоторые особенности уравнения аэродинамики однородного псевдооживленного слоя. Там же, 52—57.

16. Ковалев В. С., Дементьев В. М., Граховский Б. М. К вопросу уноса полидисперсного материала из кипящего слоя. Там же, 129—133.

17. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Тищенко А. Т., Хвастухин Ю. И., Максименко А. С. Сжигание природного газа в кипящем слое. Там же, 235—245.

18. Вальберг Г. В., Дементьев В. М., Левитова С. Л., Коробова Н. Н. Особенности сжигания природного газа при высокотемпературном обжиге спекающихся материалов. Там же, 254—263.

19. Ахундов А. А., Нехлебаев Ю. П., Дементьев В. М., Петрихина Г. А. Сжигание газообразного топлива в псевдооживленном слое при обжиге со вспучиванием глинистых и вулканических пород. Там же, 269—273.

20. Нехлебаев Ю. П., Дементьев В. М., Максименко А. С., Шкляр М. С., Хромов В. И., Канфер В. Д. О выборе жаропрочных поди для многозонной печи кипящего слоя. Там же, 297—307.

21. Дементьев В. М., Булахов Е. И., Ванжа А. Н., Болихова Л. С. Магнетизирующий обжиг табачной руды с применением природного газа. Там же, 384—391.

22. Дементьев В. М., Булахов Е. И. Анализ путей интенсификации и повышения экономичности процесса магнетизации руд в печах кипящего слоя. Там же, 395—403.

23. Красавцев Н. И., Дементьев В. М., Андронов В. Н., Канфер В. Д., Школьников В. Н., Вонаков Н. А., Мадисон Э. М., Графман С. М. О возможности обжига железорудных окатышей в кипящем слое для металлургического производства. Там же, 425—432.

24. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П. Опыт пуска в эксплуатацию трехзонной печи обжига известняка в кипящем слое. ИФЖ, 1968 г., том XIV, № 5, 921.

25. Нехлебаев Ю. П., Дементьев В. М., Чабан М. С. Движение зернистого материала через отверстия при наличии восходящего газового потока. Химия и технология топлив и масел, 1968, № 11, 38—42.

26. Дементьев В. М., Ванжа А. Н. О процессах обжига шамота в кипящем слое. Металлургическая и горнорудная промышленность, 1969 г., № 6, 50—52.

27. Гельперин Н. И., Дементьев В. М., Граховский Б. М. Динамика образования газовых пузырей в неоднородном псевдооживленном слое. Теоретические основы химической технологии, 1969 г., т. III, № 6, 874.

28. Дементьев В. М., Колесник Т. И., Ванжа А. Н., Болихова Л. С. О теплотехнической эффективности перекрестного тока в многозонных печах кипящего слоя. ИФЖ, 1969 г., т. XVII, № 2, 280—284.

29. Вальберг Г. С., Дементьев В. М., Левитова С. Л., Лидерман Е. С., Пяткина К. Т., Коробова Н. Н. Особенности обжига цементного клинкера в кипящем слое в реакторах горизонтального типа. Труды института ЮжГипроцемент, вып. XI, 1969 г., 3—26.

30. Дубинин Н. Г., Банит Е. А., Платонов П. Н., Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Чабан М. С. Кинематика потока сыпучих материалов при выпуске их из отверстий. Раздел IV в сб. «Современные проблемы механики сыпучих материалов», Москва, 1969 г., 55—61.

31. Гельперин Н. И., Граховский Б. М., Дементьев В. М. Определение средней скорости частиц в псевдооживленном слое малой высоты. Химическая промышленность, 1969 г., № 5, 371—373.

32. Нехлебаев Ю. П., Дементьев В. М., Чабан М. С. О сопротивлении движущегося плотного слоя, продуваемого газовым потоком снизу, ИФЖ, 1969, том XVI, № 3, 423—428.

33. Гельперин Н. И., Граховский Б. М., Дементьев В. М. Поперечное перемешивание частиц в неоднородном псевдооживленном слое. Теоретические основы химической технологии, 1970 г., т. IV, № 4, 591.

34. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Чабан М. С., Максименко А. С., Бондаренко Д. Т. Активность извести, получаемой в кипящем слое. Строительные материалы, 1970 г., № 6, 37—39.

35. Нехлебаев Ю. П., Дементьев В. М., Бондаренко Д. Т., Чабан М. С. К расчету переточного устройства с плотным слоем. Химия и технология топлив и масел, 1970 г., № 8, 23—28.

36. Дементьев В. М., Ванжа А. Н., Моисеенко Н. Т., Болихова Л. С. О возможности высокотемпературного обжига глины на шамот на решетчатых печах кипящего слоя. Труды ДонНИИчермет. Металлургия чугуна, 1970 г., вып. 18, 52—58.

37. Дементьев В. М., Графман С. М., Школьников В. Н., Ефанова Н. И. Окислительный упрочняющий обжиг железорудных окатышей в кипящем слое. Труды ДонНИИчермет. Металлургия чугуна, вып. 18, 1970 г., 58—68.

38. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Максименко А. С. Расчет живого сечения решеток в аппаратах с кипящим слоем зернистого материала. Труды ДонНИИчермет. Применение кипящего слоя в металлургической промышленности, 1970 г., вып. 21, 58—64.

39. Нехлебаев Ю. П., Дементьев В. М., Чабан М. С. К вопросу определения скорости истечения зернистого материала из отверстия в днище сосуда в условиях противотока газа. Там же, стр. 65—74.

40. Дементьев В. М., Болихова Л. С., Ванжа А. Н., Луговский И. А. Исследования слипания частиц в кипящем слое. Там же, 75—78.

41. Нехлебаев Ю. П., Дементьев В. М., Бондаренко Д. Т. К расчету процесса горения газа в кипящем слое. Там же, 88—96.

42. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Бондаренко Д. Т., Бойко А. В. Экспериментальное изучение горения газа в кипящем слое. Там же, 97—106.

43. Дементьев В. М., Граховский Б. М., Нехлебаев Ю. П., Вислогузов А. К. К теории обжига известняка узкофракционного состава в кипящем слое. Там же, 107—118.

44. Дементьев В. М., Булахов Е. И., Болихова Л. С. Сопоставительный анализ теплотехнических схем печей кипящего слоя для магнетизирующего обжига окислительных железных руд. Там же, 145—156.

45. Дементьев В. М., Вислогузов А. К., Сахарнова Т. М. Об идеальном цикле восстановления окисью углерода. Там же, 168—176.

46. Дементьев В. М., Вислогузов А. К. Восстановительный цикл с промежуточной регенерацией. Там же, 177—188.

47. Дементьев В. М., Вислогузов А. К., Сахарнова Т. М. Восстановительный цикл с промежуточной отмывкой. Там же, 189—198.



48. Дементьев В. М., Ванжа А. Н., Моисеенко Н. Т., Болихова Л. С. Эксперимент по обжигу глины на шамот в кипящем слое. Огнеупоры, № 4, 1971 г., 9—14.

49. Школьников В. Н., Дементьев В. М. Упрочняющий безокислительный обжиг железорудных окатышей. Metallургическая и горнорудная промышленность, 1971, № 6, 5.

50. Дементьев В. М., Болихова Л. С., Ванжа А. Н., Моисеенко Н. Т., Луговский И. А. Исследование слипания частиц в кипящем слое на холодной модели. ИФЖ, 1972, т. XXII, № 2, с. 363.

51. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Бондаренко Д. Т. О сжигании газовых смесей в кипящем слое. Сб. Тепло- и массоперенос. Научная думка, 1972 г. Том 5, часть II, стр. 167.

52. Дементьев В. М., Болихова Л. С., Ванжа А. Н. Исследование слипания частиц в кипящем слое. Там же, стр. 177.

### III. Изобретения

53. Дементьев В. М., Куликов В. О., Жуков А. И., Кумани Б. Г., Котровский М. М., Нехлебаев Ю. П. Автоматизированная газовая печь для обжига известняка в кипящем слое. Авторское свидетельство № 131384, приоритет от 29/II-1960 г.

54. Дементьев В. М., Школьников В. Н., Канфер В. Д., Шкляр М. С. Фасонный огнеупорный блок. Авторское свидетельство № 175984, приоритет от 10 августа 1964 г.

55. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Максименко Г. М., Максименко А. С., Шкляр М. С. Переточное устройство для многозонной печи. Авторское свидетельство, приоритет от 8 апреля 1968 г.

56. Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П. Шахтная печь кипящего слоя для обжига сыпучих материалов. Авторское свидетельство № 239101, приоритет от 30 июня 1966 г.

57. Вальберг Г. С., Бурковский Ю. А., Дементьев В. М., Левитова С. Л., Лидерман Е. С., Пяткина К. Т. Установка для производства цементного клинкера. Авторское свидетельство № 254373, приоритет от 14.XII-1966 г.

58. Дементьев В. М., Школьников В. Н., Графман С. М. Способ обработки магнетитовых окатышей. Авторское свидетельство № 272321, приоритет от 27 июня 1968 г.

59. Дементьев В. М., Ванжа А. Н., Болихова Л. С., Моисеенко Н. Т., Нехлебаев Ю. П., Бондаренко Д. Т., Максименко А. С., Мозговой А. Н., Шатихин В. Г., Пересада М. П. Шахтная печь кипящего слоя для обжига сыпучих материалов. Авторское свидетельство № 358598, приоритет от 30 ноября 1970 г.

60. Дементьев В. М., Ванжа А. Н., Нехлебаев Ю. П., Болихова Л. С., Моисеенко Н. Т., Чабан М. С. Способ обжига измельченного материала. Авторское свидетельство № 305335, приоритет от 31 декабря 1960 г.

61. Вольфович С. М., Вейдерман М. А., Дементьев В. М., Исламов И. М., Куузик Р. О., Ягодина Т. Н. Способ обесфторивания природных фосфатов. Авторское свидетельство № 320468 с приоритетом от 23 октября 1969 г.

62. Дидковский В. К., Канфер В. Д., Третьяков Е. В., Дементьев В. М., Нехлебаев Ю. П., Борнацкий И. И., Михневич В. Ф. Кислородный конвертер с утилизатором в виде кипящего слоя. Авторское свидетельство № 325254, приоритет от 18 ноября 1969 г.

### Отдельные вопросы диссертации доклаживались на:

1. Всесоюзном семинаре «Применение кипящего слоя в народном хозяйстве СССР», ВДНХ, Москва, 1963.

2. Научно-технической сессии института Механобр, Ленинград, 1964.

3. Всесоюзном совещании агломератчиков и доменщиков, Череповец, 1965.

4. Научно-технических советах министерств черной металлургии УССР (1969), строительных материалов РСФСР (1966), Латвийской ССР (1971) и Украинской ССР (1971).

5. Конференции по высокотемпературным эндотермическим процессам в кипящем слое. Донецк, 1966.

6. Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках. Одесса, 1967.


7. Всесоюзном научно-техническом совещании по исследованию процессов тепло- и массообмена в кипящем слое. Иваново, 1969.

8. Всесоюзном совещании по обжигу известня в кипящем слое. Донецк, 1969.

9. III Международном конгрессе по химической технологии, CHISA, Чехословакия, 1969.

10. IV Всесоюзном совещании по тепло-массообмену, Минск, 1972.

11. VII Международной конференции по промышленной энергетике, Киев, 1972.

БП 06800 31.7.73 г. 

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. л. 1,395. Печ. л. 2,79. Зак. 276. Тираж 300 экз.

---

Типография издательства «Радянська Донеччина», г. Донецк,  
ул. газеты «Социалистический Донбасс», 26.