

6
А48

АКАДЕМИЯ НАУК КАЗАХСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ

На правах рукописи

В. В. Малиновский

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО
МЕТОДА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ
КОНЦЕНТРАТОВ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Специальность № 317
Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алма-Ата
1971 г.

АКАДЕМИЯ НАУК КАЗАХСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ

На правах рукописи

В.В. Малиновский

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО
МЕТОДА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ
КОНЦЕНТРАТОВ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Специальность № 317

Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алма-Ата
1971г.

Работа выполнена в Лаборатории электроники и автоматики
Института физики высоких энергий Академии наук КазССР.

Научный руководитель - кандидат физико-математических
наук И. Г. ГРИНМАН

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А. В. ТОНКОНОГИЙ
кандидат технических наук В. И. ДЗЫГАЛО

Ведущее предприятие - Ордена Трудового Красного Знамени
Институт тепло-массообмена АН
Белорусской ССР.

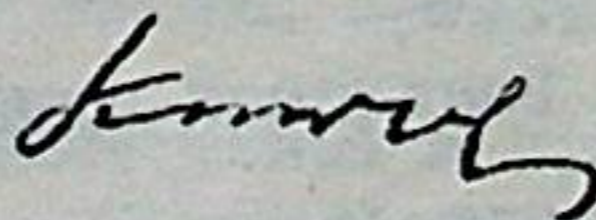
Реферат разослан "31" августа 1971 г.

Защита диссертации состоится 8 октября 1971 г. на
заседании Ученого совета Института металлургии и обога-
щения АН КазССР.

Ваши отзывы, заверенные учреждением, просим направлять
в двух экземплярах по адресу: г. Алята-Ата 2; ул. Шевченко
29/33, Институт металлургии и обогащения АН КазССР.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Ученый секретарь Совета



Ю. Ф. Ключникова

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс сушки влажных материалов является широко распространенным технологическим процессом. Влага — один из обязательных компонентов большинства твердых неметаллических материалов, используемых человеком, поэтому нет такой отрасли промышленности, где бы не применялся процесс сушки. Насколько распространена этот процесс, можно судить по тому, что более 12% топлива, добываемого в стране, тратится на сушку.

Во многих отраслях промышленности влажность готового продукта является показателем качества материалов, оказывает большое влияние на их технологические свойства. Особенно велико значение определения влажности в металлургической промышленности при сушке продуктов обогащения — концентратов и приготовления шихтовых материалов. Отсюда понятна роль, которая принадлежит приборам для измерения влажности — влагомерам.

В связи с решениями Партии и Правительства о быстром развитии автоматизации производства большое значение для автоматизации процессов сушки имеет использование и совершенствование влагомеров.

Из-за отсутствия надежных влагомеров, обладающих необходимой точностью измерений, иногда выпускается продукция по качеству не соответствующая ГОСТ, в ряде производств не созданы непрерывно-поточные линии и не оптимизирован процесс сушки с точки зрения времени сушки и расхода топливных ресурсов.

Если для контроля влажности однородных по физико-химическому составу материалов разработано несколько методов и достаточное количество типов автоматических влагомеров, обеспечивающих

автоматизацию процессов сушки, то влагомеров для автоматического измерения влажности сыпучих материалов с переменным гранулометрическим и химическим составом, какими являются рудные концентраты, непосредственно в потоке практически нет. В этом случае контроль влажности осуществляется периодически и управление ведется на основе предыдущей статистики.

Цель настоящей работы состояла в исследовании предложенного способа измерения влажности на основе термографического метода для автоматического определения влажности движущихся рудных концентратов, разработке конструкций автоматических датчиков влажности, проверке работоспособности их в производственных условиях и обосновании рекомендаций для систем автоматического регулирования процесса сушки сыпучих материалов (концентратов).

Актуальность данной работы состоит в том, что имея автоматический датчик влажности (влагомер) для сыпучих движущихся материалов, обладающий рядом преимуществ перед электрическими и некоторыми физическими влагомерами, возможно применение недорогих и надежных систем автоматического регулирования процесса сушки рудных концентратов с регулированием по прямому параметру сушки-влажности.

Некоторые работающие САР управляют процессом сушки по косвенным параметрам (величинам, связанным каким-нибудь образом с влажностью), что вызывает усложнение системы и снижение точности регулирования.

В условиях Казахстана с хорошо развитой металлургией вопрос автоматизации процесса сушки несомненно представляет практический интерес. Работа выполнялась применительно к процессу сушки продуктов обогащения цветной металлургии — медных концентратов.

Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов.

В первой главе "Современное состояние контроля влажности и процесса сушки концентратов руд цветных металлов" (литературном обзоре) рассмотрены вопросы, имеющие прямое отношение к предмету данной работы. Приведены существующие методы измерения влажности и отмечены их недостатки, ограничивающие применение для определения влажности движущихся сыпучих материалов.

На примере нескольких типовых систем автоматического регулирования процесса сушки сыпучих материалов по косвенным параметрам, определенным статистически, показано, что они не могут обеспечить высокой точности поддержания регулируемого параметра.

В последующих пяти главах изложены результаты исследования предложенного способа измерения влажности неподвижных и движущихся сыпучих материалов, описание разработанного и испытанного в промышленных условиях термографического влагомера с несколькими типами датчиков, даны рекомендации по автоматизации процесса сушки продуктов обогащения руд - медных концентратов, в том числе разработанная структурная схема автоматического регулирования процесса сушки по прямому параметру - влажности.

Содержание диссертации изложено на 148 страницах машинописного текста, иллюстрировано 9 таблицами и 53 рисунками.

Ниже кратко приведено содержание последующих пяти глав.

II. ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Термографический метод является одним из лучших методов для изучения фазового состава и фазовых превращений, протекающих при определенных для каждого вещества температурах. Чтобы обнаружить фазовые превращения, следует плавным нагреванием (охлаждением) довести исследуемое вещество до нужной температуры.

Регистрируя одновременно изменение температуры во времени,

можно видеть, что рассматриваемые процессы отразятся на плавных кривых нагревания отклонениями или ровными площадками, т.е. при возникновении тех или иных превращений в веществе сразу изменится скорость нагревания. Термограммы на основании полной их воспроизводимости, кроме качественного фазового анализа, можно использовать и для количественного определения вещества, содержащегося в исследуемом материале. Это свойство термограмм положено в основу предложенного способа определения влажности веществ /1, 4/.

На рис. I приведены идеализированные термограммы контактной сушки материала для проб разной влажности (W).

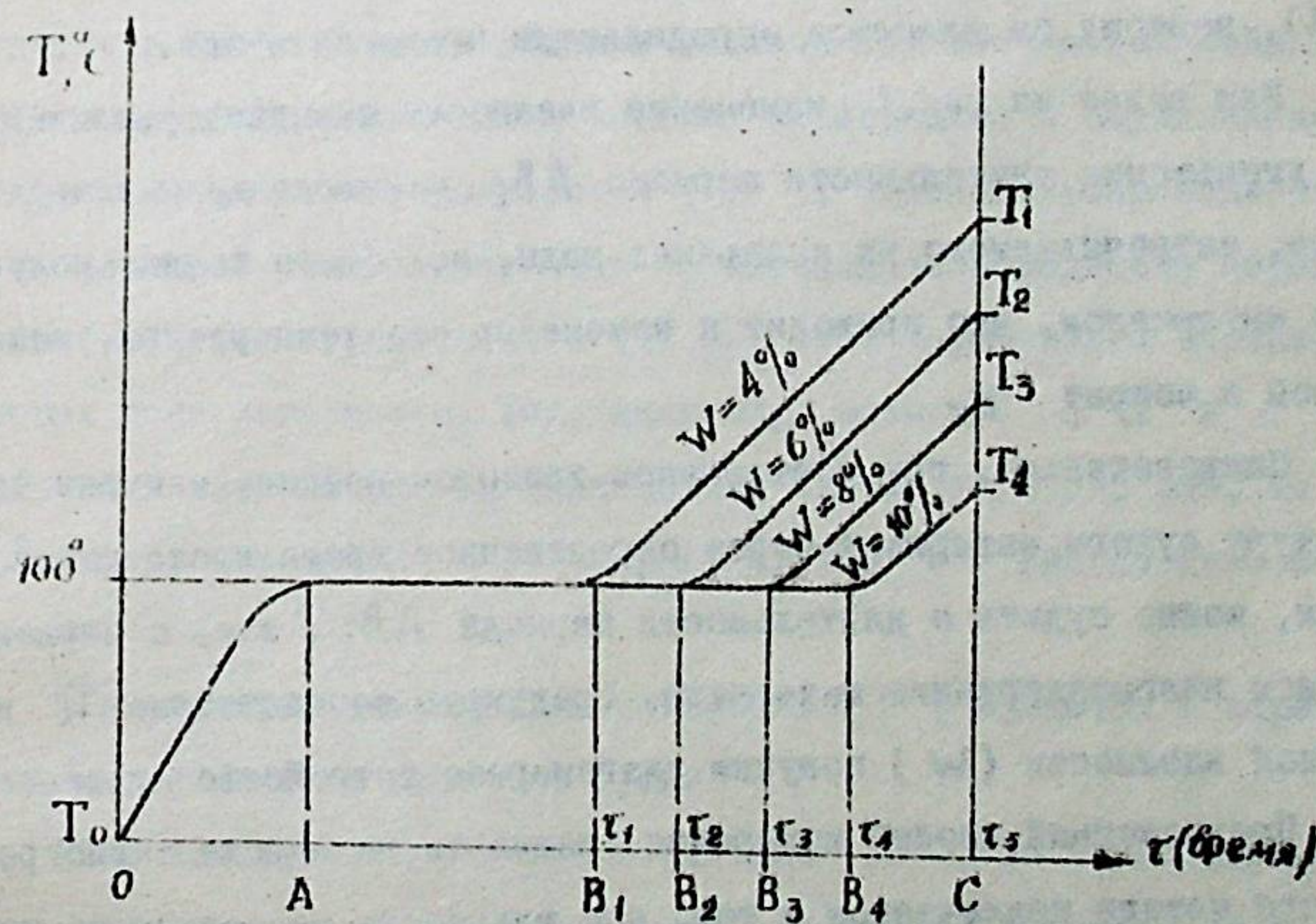


Рис. I

Весь процесс сушки можно разделить на три периода. Период OA - нагрева влажного материала от его начальной температуры T_0 до температуры $T \approx +100^\circ\text{C}$, которую при нормальном барометрическом давлении сохраняет материал до выкипания из него воды.

Период АВ₁ - испарения влаги и период В₁С - нагрева абсолютно сухого материала от температуры +100°С до температуры Т₁. Параллельность термограммы в этом периоде обусловлена равенством скоростей нагрева сухих проб, у которых удельные теплоемкости равны.

Площади, ограниченные термограммами и ось времени (ОТ), до момента τ₅ при постоянном тепловом потоке будут пропорциональны количеству тепла, затраченному на испарение воды и нагрев сухого материала от температуры Т₀ до Т₁.

При высокointенсивном нагреве в период постоянной скорости сушки (АВ₁) удалится в основном вся влага из материала (85-95%), поэтому он является определяющим процессом сушки.

Как видно из рис.1, изменение влажности вызывает увеличение или уменьшение длительности периода АВ₁ и изменение количества тепла, затрачиваемого на испарение воды, из общего тепла, полученного материалом, что приводит к изменению его температуры, измеряемой в момент τ₅.

Следовательно, при постоянном тепловом потоке, измеряя температуру сухого материала через определенное время после начала сушки, можно судить о длительности периода АВ₁, т.е. о первоначальном влагосодержании материала. Градуировав соответствие Т₁ начальной влажности (W) получим влагомерное устройство - влагомер.

Предложенный способ измерения влажности на основе термографического метода заключается в том, что влажность исследуемого материала определяется по количеству энергии, затраченной на испарение воды, которая при интенсивной контактной сушке постоянным потоком тепла будет пропорциональна температуре абсолютно сухого материала, измеряемой через фиксированное время после начала сушки, которое больше времени, необходимого для сушки материала с максималь-

ним для опытов влагосодержанием.

При движении влажного материала около неподвижного нагревателя фиксирование момента измерения температуры сухого материала (τ₅) обеспечивается постоянством скорости его движения. В квазистационарном режиме (W=const) температуры греющей поверхности (Т_г) и материала (Т_м) будут постоянны. Увеличение влажности вызывает снижение Т_м и Т_г на более низкий термический уровень.

Аналитическое нахождение зависимости температуры сухого материала от его первоначального влагосодержания пока представляется неразрешимой задачей. Трудность математического решения ее заключается в необходимости решения нескольких систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами /теплопроводности (λ), температуропроводности (α), удельной теплоемкости (с), потенциалопроводности переноса массы (α') термоградиентного (δ) /, учет переменного характера которых пока невозможен. Так, например, если λ, α и с изменяется в зависимости от влажности и плотности в 3-5 раз, то α' и δ могут изменяться в 30-40 раз, причем δ иногда даже меняет знак.

С изменением температуры материала (Т) меняется и характер тепло-массообмена в процессе сушки.

Если температура материала не выше +50°С, то влага перемещается лишь в виде жидкости, испарения ее внутри влажного тела почти не происходит (удельный вес фактора, обуславливающего перенос тепла паром, составляет менее 10% от полного эффекта переноса тепла), поэтому температурное поле находится по уравнению теплопроводности (I), не осложненному массообменом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T \quad (1)$$

Поле влагосодержаний материала находится из уравнения массопроводности (2)

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \alpha' \nabla^2 u + \alpha' \delta \nabla^2 T \quad (2)$$

С увеличением температуры материала выше +50°C и меньше +100°C в уравнении теплопроводности необходимо учитывать перенос тепла массой испаряющейся жидкости, поэтому уравнения (1,2) будут иметь вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T + \frac{1}{c} \epsilon \gamma \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \alpha' \nabla^2 u + \alpha' \delta \nabla^2 T, \quad (4)$$

- где ϵ - безразмерный критерий внутреннего испарения;
 γ - теплосодержание влаги, перемещающейся внутри материала;
 c - приведенная удельная теплоемкость материала, равная сумме теплоемкостей абсолютно сухого материала c_c и удельной теплоемкости его влаги c_v .

При повышении температуры греющей поверхности значительно больше +100°C благодаря значительному температурному градиенту между нагретой поверхностью и материалом скорость перемещения влаги в нем в виде жидкости будет почти равна нулю (термолакопроводность препятствует перемещению влаги путем влагопроводности).

В этом случае процесс сушки неподвижного материала можно рассматривать аналогично задаче о промерзании грунта, т.е., обозначив индексами 1 и 2 параметры, относящиеся к сухому и влажному материалу, задача формулируется так:

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0, 0 < x < \xi), \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0, \xi < x < \infty), \quad (6)$$

$$T_1(0, x) = T_2(0, x) = T_0 = \text{const}, \quad (7)$$

$$T_2(0, \tau) = T_c, \quad (8)$$

$$T_2(\infty, \tau) = T_0, \quad (9)$$

$$T_1(\xi, \tau) = T_2(\xi, \tau) = T_{nc} = 100^\circ \quad (10)$$

и на границе испарения

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi, \tau)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x} = \tau j_0 \frac{W}{100} \frac{d\xi}{d\tau} \quad (11)$$

Решение этой задачи в критерияльной форме имеет вид:

$$\vartheta_1 = \frac{T_1 - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \frac{T_c - T_{nc}}{T_c - T_0} \frac{\text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_1 \tau}} \right)}{\text{erfc} \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha_1 \tau}} \right)}; \quad (12)$$

$$\vartheta_2 = \frac{T_2 - T_0}{T_c - T_0} = \frac{T_{nc} - T_0}{T_c - T_0} \frac{\text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_2 \tau}} \right)}{\text{erfc} \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\alpha_2 \tau}} \right)}. \quad (13)$$

Углубление границы фазового перехода определяется формулой

$$\xi = \beta \sqrt{\tau}, \quad (14)$$

где β - коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость углубления зоны испарения, определяется из граничного условия (11).

В этом решении предполагалось, что температура нагревателя в процессе сушки поддерживается постоянной и теплофизические коэффициенты влажного и сухого материала в ходе опыта не изменяются. При работе термографического влагомера стабилизируется мощность, а не температура нагревателя, поэтому, рассматривая

греющую поверхность и влажный материал как систему из двух тел, приведенных в соприкосновение, необходимо решить уравнения (5) и (6), где индексы 1 и 2 будут означать температуру греющей поверхности и материала при начальных условиях (начало координат находится в месте соприкосновения тел):

$$T_1(x, 0) = T_0, \quad T_2(x, 0) = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_1(+\infty, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(-\infty, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (16)$$

$$T_1(0, \tau) = T_2(0, \tau), \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial T_2(0, \tau)}{\partial x} \quad (18)$$

Из решения

$$\frac{T_1(x, \tau)}{T_0} = \frac{1}{1+\delta} \left[1 + \delta \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) \right] \quad (x > 0), \quad (19)$$

$$\frac{T_2(x, \tau)}{T_0} = \frac{1}{1+\delta} \operatorname{erfc} \left(\frac{-x}{2\sqrt{a_2\tau}} \right) \quad (x < 0), \quad (20)$$

где $\delta = \frac{\lambda_2 \sqrt{a_1}}{\lambda_1 \sqrt{a_2}} = \sqrt{\frac{\lambda_2 c_2 \beta_2}{\lambda_1 c_1 \beta_1}}$ — термофизический критерий,

видим, что в процессе теплообмена изменяются температуры греющей поверхности и влажного материала,

Рассмотренные выше процессы относятся к неподвижным телам, в то же время при работе термографического влагомера материал движется. Это движение учитывается уравнением теплопроводности движущегося абсолютно сухого материала

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (21)$$

(где w_i — компоненты скорости движения)

и решением уравнений, описывающих теплообмен нагретого стержня с обтекающей его жидкостью, так как влагу в твердом теле, являющуюся основным теплоносителем, нельзя рассматривать компонентом гетерогенного вещества. Из этого решения можно найти удельный тепловой поток нагревательной пластины:

$$q(\tau) = \lambda_1 T_0 \sqrt{\frac{\rho_e}{D_e}} \exp \left[-\lambda_1 \sqrt{\frac{\rho_e}{D_e}} \frac{\tau}{c_2 \beta_2 R} \right]. \quad (22)$$

Как видно из выражения (22), с течением времени удельный тепловой поток нагревательной пластины убывает по закону экспоненты, что соответствует переходному процессу работы влагомера при изменении влажности, после которого наступает квазистационарный режим, и температура ее будет постоянной.

Не имея возможности определить из приведенного математического описания процессов, происходящих при контактной сушке движущегося влажного материала около греющей поверхности, зависимость температуры высушенного материала от начального влагосодержания, являющейся функцией многих факторов, ограничимся ориентировочным ее расчетом на основе теплового баланса.

Для квазистационарного режима, когда коэффициент теплообмена (α), нагреваемая площадь (S) и вес сухого материала (G_c), а так же время (τ), через которое измеряется температура материала после сушки будут постоянными, однозначная зависимость температуры поверхности абсолютно сухого материала (T_n) от влажности выразится формулой (23)

$$T_n = T_r - \left[\left(c_0 + \frac{c_0 W}{100} \right) \frac{dT_{cp}}{d\tau} + \tau \frac{dW}{d\tau} \frac{1}{100} \right] \frac{G_c}{\alpha S}, \quad (23)$$

где T_r — температура греющей поверхности;
 T_{cp} — средняя по объему температура материала;
 τ — удельная теплота фазового перехода.

В приведенных выводах для упрощения принималось постоянство теплофизических характеристик материала, хотя известно, что теплопроводность - λ , удельная теплоемкость - C , коэффициент температуропроводности - α зависят от плотности, влажности, температуры и химического состава материала.

Определение реальных процессов, происходящих при работе термографического влагомера, явилось целью лабораторных исследований /5/. Исследования проводились с помощью изготовленных лабораторных установок: сушилки, термостата и мешалки.

В результате исследований определены отличительные особенности высокоинтенсивной контактной суши нагревателем, установленным внутри движущегося сыпучего материала, основными из которых являются:

температура фазового перехода у нагревателя при нормальном барометрическом давлении меньше $+100^{\circ}\text{C}$, что объясняется интенсивным парообразованием в макрокапиллярах;

градиент общего давления, возникающий в процессе превращения воды в пар, в сыпучих материалах практически отсутствует;

влагосодержание слоев материала по мере удаления от нагревателя в процессе сушки увеличивается за счет диффузии и конденсации пара;

граница фазового перехода при работе влагомера в квазистационарном режиме неподвижна и направлена под некоторым углом (ψ) к поверхности нагревателя;

- в переходном режиме граница фазового перехода углубляется с увеличенной скоростью (β) на величину (ξ), которую в общем виде можно выразить так:

$$\xi = \beta \tau^x \quad (x = 0,03 + 0,4) \quad (24)$$

На основании теоретических и экспериментальных данных об

изменении теплофизических свойств сыпучих материалов в диапазоне рабочих температур и давлений можно утверждать, что термографический метод позволяет определять влажность сыпучих материалов с точностью 0,1%.

III. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ ВЛАГОМЕР ДЛЯ ДВИЖУЩИХСЯ КОНЦЕНТРАТОВ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Термографический влагомер состоит из систем: нагревания материала, измерительной, крепления датчика и блокировки /2,5,6/.

Система нагревания материала включает в себя тепловыделяющий элемент с токопроводами и источник питания.

В качестве тепловыделяющего элемента употребляется стальная пластина, нагреваемая стабилизированным электрическим током промышленной частоты напряжения 2-8 вольт. Источником питания элемента служит трансформатор, обеспечивающий во вторичной обмотке большие (до 100-200 А) рабочие токи. Первичная обмотка трансформатора питается стабилизированным регулируемым напряжением 80-220 в.

Измерительная система состоит из термодар, измеряющих температуры влажного и сухого материала, и регистрирующего устройства, в качестве которого могут применяться автоматически потенциометры постоянного тока.

Системы крепления датчика и блокировки определяются условиями работы влагомера. Блокировка предусматривает снятие напряжения питания тепловыделяющего элемента при остановке движения влажного материала или уменьшения его под датчиком ниже допустимого уровня.

Во втором случае одновременно выключается регистрирующее устройство.

Тепловыделяющий элемент и термопары размещены в датчике влагомера, изображенном на рис. 2. Датчик влажности состоит из

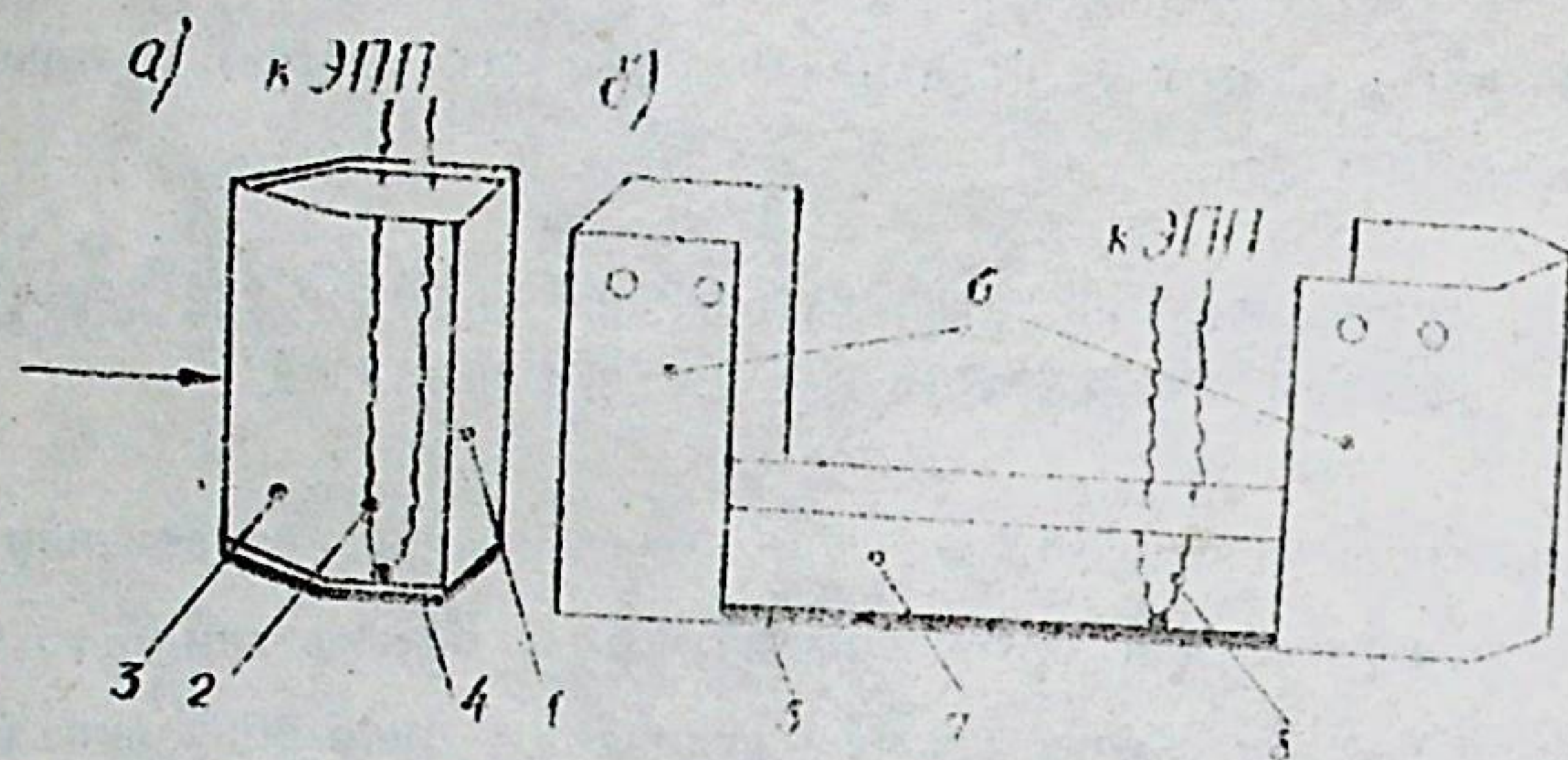


рис. 2

измерителя температуры влажного материала (а) и тепловыделяющего элемента с термопарой (б). Измеритель температуры выполнен из текстолита в виде призмы (1) с прикрепленной внизу пластиной из нержавеющей стали (4), которая нагревается до температуры движущегося около нее влажного материала и измеряется термопарой (2).

Для механической прочности измеритель защищен стальным кожухом (3). В нагревателе (б) стальная пластина (5) приварена к низкоомным креплениям (6), которые служат для соединения с токоведущими шинами и одновременно радиаторами, исключая их нагрев. Температура пластины измеряется термопарой (8), прижимаемой к ней теплоизоляционным вкладышем (7). Измерение температуры греющей пластины, а не материала после сушки, осуществляется из-за сложности защиты термопары от механических воздействий (абразивность материала, посторонние предметы, попадающие в сушилку, и т.д.), трудности удержания термопары в объеме высушенной части материала, имеющего незначительные размеры при значительных ко-

лебанных массы движущегося сыпучего материала, и для повышения чувствительности влагомера, которая снижается у сыпучих материалов вследствие эффективного теплообмена сухого материала после датчика с влажным материалом, имеющим значительно меньшую температуру. Кроме того, изменению влажности на 1% соответствует изменение температуры материала на градус, тогда как температура пластины изменяется на десятки градусов.

Испытания термографического влагомера для бедных концентратов проводились в производственных условиях на сушильно-фильтровальном участке обогатительной фабрики Балхашского горнометаллургического комбината в 1968-1969 гг./7/. Измерялась влажность материала после сушильных барабанов. Влагомер устанавливался на транспортере, как показано на рис. 3.

Для сохранения положения датчика (1) параллельно потоку материала (2) он крепился к поплачковому устройству (3), которое подвижными тягами (4) крепилось к пылезащитному корпусу транспортера. Поплачковое устройство, кроме того, обеспечивало равномерное уплотнение материала под датчиком.

Измерительные термопары (5, 6) включены дифференциально, чем исключается влияние переменной температуры влажного материала на результаты измерений. Следовательно, регистрирующее устройство (7)-автоматический самопишущий потенциометр типа ЭПП-120, фиксирует температуру нагревательной пластины относительно условного нуля, равного температуре влажного материала. Шкала самописца градуируется в процентах влажности. В потенциометр встроено устройство для изменения диапазона измерений влагомера.

Кроме датчика, изображенного на рис. 2, разработаны и испытаны в лабораторных условиях датчики для перемешиваемых увлажняемых сыпучих материалов /8/ и для материалов низкой (3-4%) влажности.

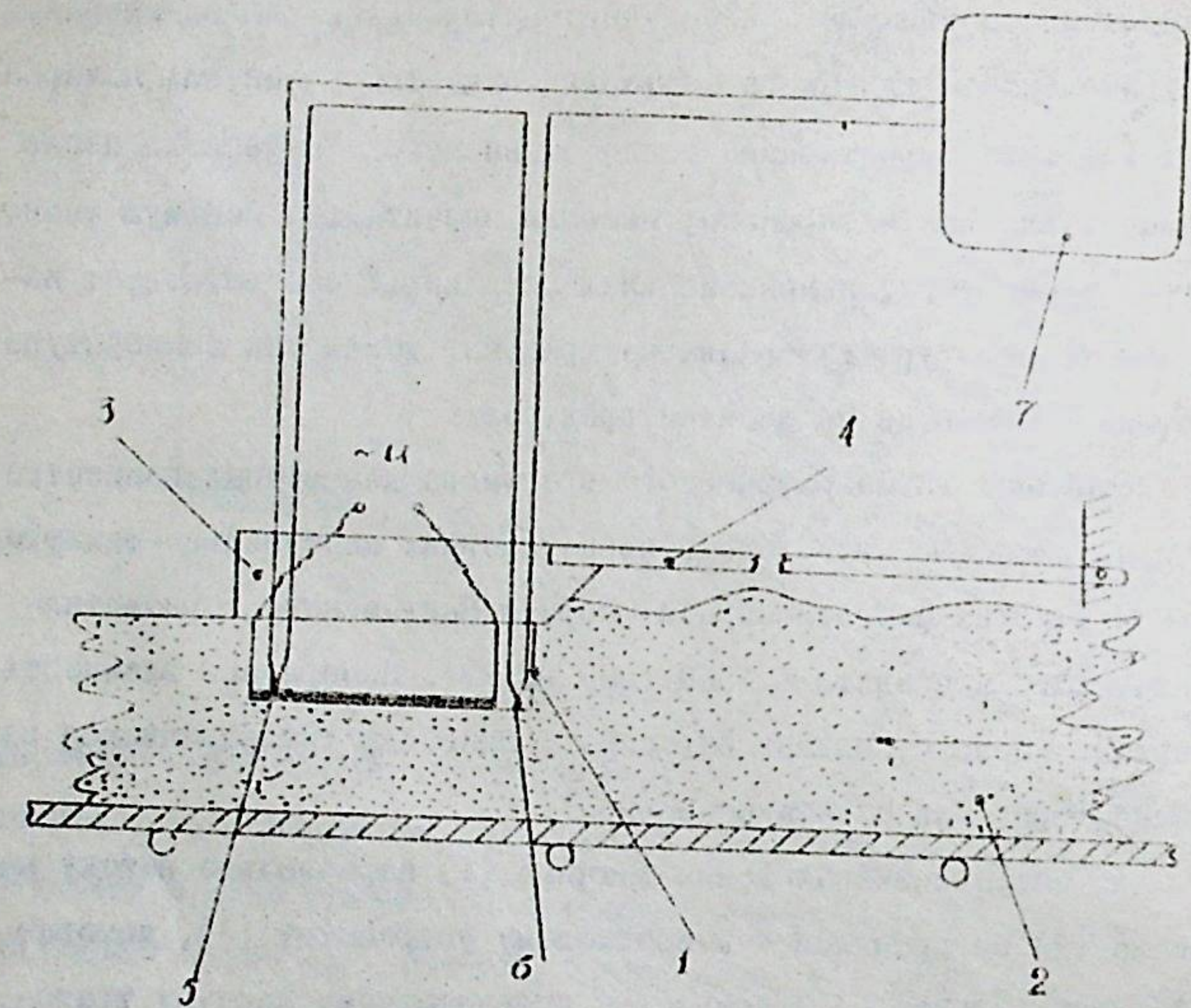


Рис. 3

В работе приведена методика инженерного расчета элементов влагомера и произведен анализ погрешностей и точности влагомера.

Результаты измерений влагомера являются функцией не только влажности (W), но и других переменных (λ_i), которые можно объединить в четыре группы:

свойства исследуемого материала: начальная температура (T_0), теплопроводность (λ), распределение влаги, гранулометрический (Γ) и химический (X) состав;

величины, влияющие на измерительное (И) устройство /напряжение питания; частота тока, износ нагревательной пластины и погрешности регистрирующего устройства/;



внешние факторы: скорость движения материала V и атмосферные A условия (давление, температура и влажность воздуха); замена датчика (Д).

В общем случае результат измерения влагомером, в зависимости от перечисленных факторов, можно описать уравнением

$$d\mu = \frac{\partial \mu}{\partial W} dW + \frac{\partial \mu}{\partial T_0} dT_0 + \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial \mu}{\partial \Gamma} d\Gamma + \frac{\partial \mu}{\partial X} dX + \frac{\partial \mu}{\partial I} dI + \frac{\partial \mu}{\partial V} dV + \frac{\partial \mu}{\partial A} dA + \frac{\partial \mu}{\partial D} dD, \quad (25)$$

где μ - выходная величина влагомера (напряжение).

На основании теоретических и экспериментальных данных оценено влияние перечисленных факторов на результаты измерений влажности движущегося материала.

Температура влажного материала учитывается конструкцией влагомера и не вносит погрешности в измерения.

Теплопроводность материала, зависящая от влажности и температуры, не влияет на измерения ввиду того, что они производятся после максимума теплопередачи (определенный для медного концентрата, он соответствует влажности 7,5% и температуре +80°C), когда коэффициент λ имеет постоянное значение.

Гранулометрический состав влияет на теплопроводность за счет включений воздуха в пустотах. Однако у сыпучих материалов существует некоторое предельное уплотнение, после которого теплопередача практически не изменяется. Экспериментально мы определили, что у медного концентрата оно наступает при давлении уплотнения 20-23 г/см².

Химический состав изменяет удельную теплоемкость материала, но влиянием его на результаты измерений термографического влагомера можно пренебречь. Независимость результатов измерений основывается на малом изменении удельных теплоемкостей всех горных пород

($\Delta c = 0,1$) и значительном их различии с удельной теплоемкостью воды и теплотой фазового превращения, в результате чего изменение влагосодержания влияет на результаты измерения на несколько порядков больше, чем изменение химического состава материала.

Кроме того, как отмечено рядом исследователей, коэффициенты теплопроводности материалов разных по химическому составу твердых скелетов при одинаковой пористости равны между собой, если заполнителем является вода.

Остальные факторы вносят погрешности от $\pm 0,05$ до $0,1\%$ влажности.

Отсутствие образцового метода определения влажности не позволило оценить точность работы влагомера путем нескольких сличений. Оценка точности проведена статистической обработкой результатов 324 одновременных измерений влагомером и методом высушивания, точность которого может быть повышена до $0,1-0,2\%$ при соблюдении определенных условий^{х)}.

Правильность работы влагомера характеризуется уравнением регрессии

$$y_x = 0,12 + 0,997x \quad (26)$$

и коэффициентом корреляции $r_x = 0,995$.

Точность измерений термографического влагомера характеризуется вероятной погрешностью измерений $\rho = 0,14\% W$.

При анализе чувствительности метода /9/ определено

$$\frac{dT}{dW} = - \frac{1}{100} \frac{z}{c_0}, \quad (27)$$

где z - теплота фазового перехода,

х) Берлинер М.А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М., 1965.

Ломак В.И. Разработка образцового метода измерения влажности зерна. Об. "Измерение влажности твердых материалов и газов". ЦНИИэлектропром, 1960.

что чувствительность однозначно зависит от теплоемкости материала. Экспериментально определенная чувствительность ($S = 44^\circ/1\% W$) меньше аналитически рассчитанной на 4° , что объясняется в учетом потерь тепла формулой (23).

Средняя квадратическая погрешность воспроизводимости результата равна

$$\delta_y = 0,057,$$

что соответствует 0,5 деления шкалы самопишущего прибора для диапазона измерений $0-10\% W$. Порог чувствительности и динамическая погрешность влагомера определяются параметрами самопишущего потенциометра.

IV. ПРИМЕНЕНИЕ ВЛАГОМЕРА В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ МЕДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Процесс сушки непрерывного потока мелкодисперсных сыпучих материалов представляет значительные трудности для автоматизации, в то же время нерегулируемая сушка приводит к значительным потерям материала, нарушению технологического режима работы фабрики, снижению производительности труда и дополнительному расходу топлива.

Эти трудности связаны со сложностью контроля влажности материала после сушки с учетом нестабильных факторов, влияющих на процесс сушки. Наличие влагометрических приборов для движущихся сыпучих материалов позволяет разрабатывать системы автоматического регулирования при управлении по главному параметру сушки - влажности.

Такая система для сушки медных концентратов разработана и исследована /3/. Ее структурная схема приведена на рис.4. Она состоит из двух контуров связанного регулирования: контура "влажность-топливо" / $k_5, W_2(p), k_9$ / и "температура-вторичный воздух" / $k_9, W_3(p), k_{12}$ /. Автономная система "топливо-первичный воздух" не показана на структурной схеме.

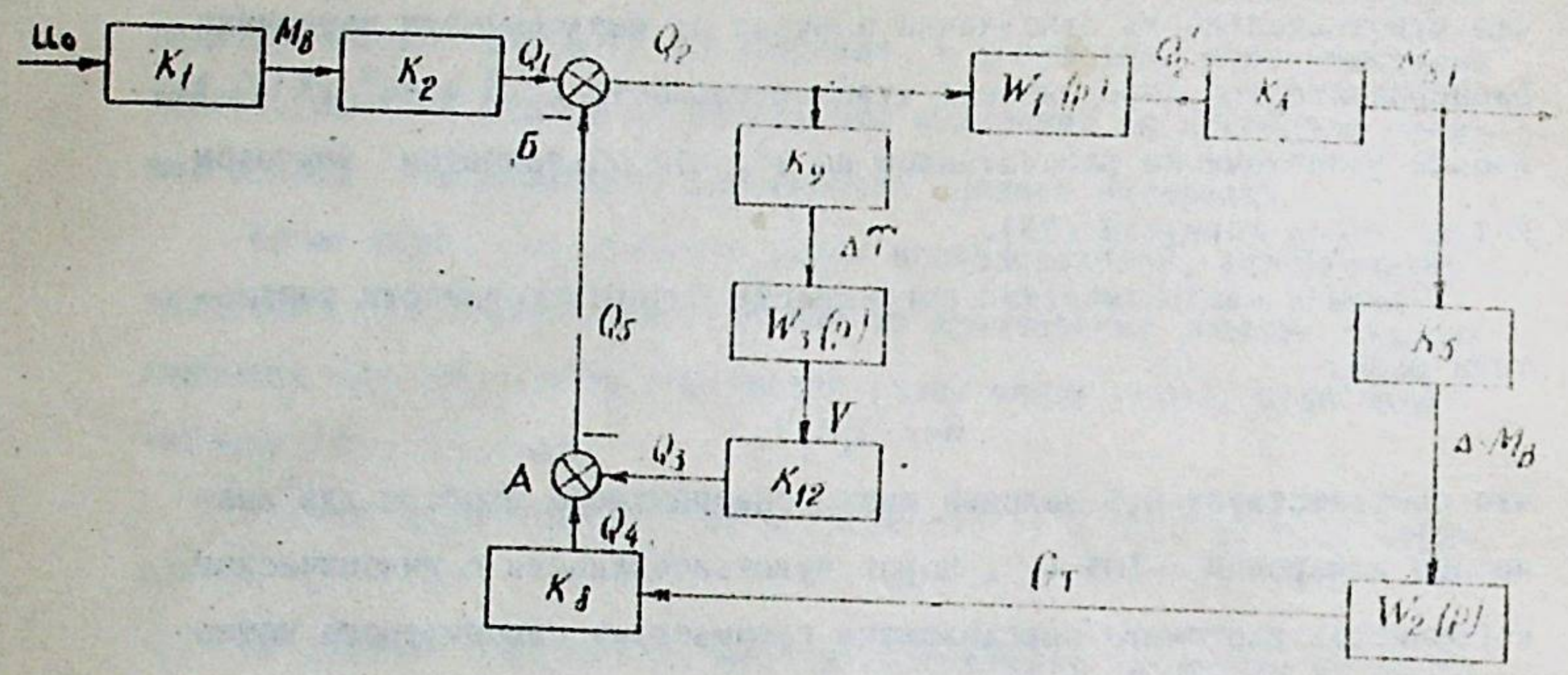


Рис. 4

Отличие данной схемы от известных заключается в том, что регулирование осуществляется по прямому параметру, а в качестве управляющего воздействия выбрано количество и энтальпия вторичного воздуха, в результате чего расширяется зона основной сушки, занимающей примерно 1/4 длины сушильного барабана от входа, увеличивается воздействие на материал в зоне подсушивания барабана и уменьшается инерционность процесса.

В рассматриваемой схеме отклонение влажности материала от заданной (ΔM_B), измеренное влагомером (K_5), воздействует на регулятор топлива / $W_2(p)$ /, поступающего в топку (K_8).

Температура топочных газов измеряется (K_9) не на входе в сушильный барабан, а в зоне основной сушки и стабилизируется изменением количества вторичного воздуха через регулятор воздуха / $W_3(p)$ /, поступающего в камеру смешения (А). В результате расширяется зона основной сушки, повышается температура в зоне подсушивания и уменьшается время запаздывания сушильного барабана.

Объект регулирования - сушильный барабан представляется последовательным соединением апериодического звена первого порядка и звена чистого запаздывания.

Его передаточная функция

$$W_1(p) = \frac{k_3}{1+T_1 p} e^{-p\tau} \quad (28)$$

Передаточная функция замкнутой системы будет:

$$\Phi(p) = \frac{\alpha}{(1+T_1 p)e^{p\tau} + \frac{\beta(1+T_2 p)}{p} + \delta(1+T_1 p)(1+T_3 p)e^{p\tau}}, \quad (29)$$

где $\alpha = k_1 k_2 k_3 k_4$, $\beta = k_3 k_4 k_5 k_6 k_8$, $\delta = k_9 k_{10} k_{12}$.

Частотная передаточная функция разомкнутой системы, употреблявшаяся при анализе системы, содержащей звено чистого запаздывания, имела вид:

$$W(j\omega) = \frac{k k' - \omega^2 k(T_1 + k'T_1 T_3) + \omega^2 k T_2 (k'T_1 + k'T_3 + 1) - j[\omega k(k'T_1 + k'T_3 + 1) + \omega^2 k T_2 (T_1 - k'T_1 T_3) - k k' \omega T_2]}{[k' - \omega^2 (T_1 + k'T_1 T_3)]^2 + \omega^2 (k'T_1 + k'T_3 + 1)^2} \quad (30)$$

Из анализа системы установлено, что она устойчива, величина перерегулирования $\sigma = 20\%$, число колебаний - 3, время регулирования $t_{рег.} = 0,3$.

Рассмотренная система обеспечит процесс сушки с заданной точностью при стабилизации плотности сгущенного продукта, поступающего на вакуум-фильтры и непрерывной загрузки влажным материалом, для чего необходима установка перед сушильным барабаном бункера-питателя с дозированной подачей материала. Отсутствие сложных вычислительных и оптимизирующих устройств снижает стоимость и повышает надежность системы.

Применение системы автоматического регулирования процесса сушки рудных концентратов, кроме повышения производительности сушилок, повышает культуру труда обслуживающего персонала (ручной отбор проб, определение влажности готового продукта, регулировка подачи топлива и воздуха выполняются автоматически).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

I. Проведен анализ существующих методов измерения влажности и систем автоматического регулирования процессов сушки сыпучих материалов. Широко распространенные электрические влагомеры при измерении влажности сыпучих движущихся материалов обладают существенными недостатками (зависимость результатов измерений от физико-химического состава, температуры и плотности материала), уменьшение влияния которых достигается значительным усложнением аппаратуры. Из-за отсутствия надежных автоматических датчиков влажности в некоторых существующих системах автоматического регулирования процессов сушки сыпучих материалов осуществляется по косвенным параметрам.

2. Предложен, теоретически обоснован и исследован способ измерения влажности на основе термографического метода, заключающийся в том, что влагосодержание материала определяется по количеству энергии, затраченной на испарение из него воды.

3. Показано, что данный способ не зависит от переменного химического состава и температуры исследуемого материала и может применяться для автоматического контроля влажности движущихся сыпучих материалов.

4. Разработаны несколько типов влагомеров, позволяющих измерять влажность смесей нескольких сыпучих материалов различных по физико-химическому составу и влагосодержанию, увлажняемых в про-

цессе переувлажнения или после сушки в сушильных аппаратах при движении в бункерах и на конвейерах.

5. Экспериментально и теоретически рассмотрены особенности процесса высокоинтенсивной контактной сушки нагревателем, помещенным внутри движущегося влажного материала.

6. Дана классификация и оценка погрешностей влагомера.

7. Проведены испытания влагомера в промышленных условиях по автоматическому определению влажности продукта обогащения - медного концентрата после сушки его в сушильных барабанах сушильно-фильтровального участка Балхашской обогатительной фабрики. Результаты испытаний подтвердили правильность теоретических предположений в части точности измерения влажности и надежности в эксплуатации термографического влагомера.

8. Определены характеристики влагомера. Основные из них:

точность измерения - 0,2% W ;

диапазон измерений - 0-10% W (на испытаниях);

чувствительность - 44° на 1% влажности (10 делений шкалы прибора ЭПП-120);

потребляемая мощность - 0,9 квт;

рабочее напряжение датчика - 6,0 вольт.

9. Предложена методика инженерного расчета элементов влагомера.

10. Термографический влагомер, обладая механической прочностью, отсутствием неустойчивых схем в устройстве, безопасный для обслуживающего персонала, может служить датчиком влажности в системах автоматического регулирования.

II. Разработана и исследована структурная схема автоматического регулирования процесса сушки рудных концентратов при управлении по прямому параметру сушки-влажности, с использованием

термографического влагомера.

Особенностью системы является то, что отклонение влажности от заданной изменяет количество теплоносителя, подаваемого в сушильный барабан, с оптимальной температурой.

12. Предложенный способ измерения влажности — это первый опыт применения метода термического анализа для контроля движущихся материалов. Дальнейшие исследования метода представляют возможности для автоматизации в различных отраслях промышленности процессов сушки или увлажнения, сдерживаемых в настоящее время отсутствием датчиков влажности.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОКЛАДЫВАЛИСЬ НА СЛЕДУЮЩИХ
КОНФЕРЕНЦИЯХ И СОВЕЩАНИЯХ:**

1. III Всесоюзная конференция по совершенствованию методов определения влагосодержания в различных средах на основе применения новых влагомерных приборов, г. Киев, декабрь 1970 г.

2. II Казахстанская конференция по автоматизации производственных процессов, г. Алма-Ата, октябрь 1968 г.

3. Совещание технического совета медной обогатительной фабрики Балхашского ГМК, декабрь 1969 г.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Исследование термографического метода для автоматического контроля влажности концентратов. Изв. АН КазССР, серия физико-математическая, № 2, 1969, в соавторстве с И. Г. Гринманом.

2. Автоматический влагомер для контроля и регулирования влажности медного концентрата в процессе сушки. Сб. "Автоматизация производственных процессов", Алма-Ата, "Наука", 1970, в соавторстве с И. Г. Гринманом.

3. Исследование системы автоматического регулирования процесса сушки сыпучих материалов. Изв. АН КазССР, серия физико-математическая, № 4, 1970, в соавторстве с И. Г. Гринманом.

4. Термографический метод автоматического определения влагосодержания сыпучих материалов в потоке. Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной конференции по влагометрии, Киев, 1970, в соавторстве с И. Г. Гринманом.

5. Разработка термографического датчика для контроля влажности сыпучих материалов и системы автоматического регулирования влажности. Государственная регистрация НИР № Б097433, ВНИИЦ, 1971, в соавторстве с И. Г. Гринманом.

6. Автоматические термографические влагомеры (техническое описание), Алма-Ата, 1971.

7. Результаты испытаний термографического влагомера на обогатительной фабрике. Бюллетень "Обогащение руд", (в печати), в соавторстве с И. Г. Гринманом.

8. Термографический влагомер для сыпучих увлажняемых материалов. Журнал "Стекло и керамика", (в печати), в соавторстве с И. Г. Гринманом.

9. О точности термографического метода автоматического определения влагосодержания сыпучих материалов в потоке. Журнал "Измерительная техника", (в печати), в соавторстве с И. Г. Гринманом.