

66
1-33
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский технологический институт
имени С. М. Кирова

На правах рукописи

В. Я. ЛЕБЕДЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ДИСПЕРСНЫХ
ПОТОКОВ В КОМБИНИРОВАННЫХ СУШИЛКАХ СО
ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ**

**0.5. 347 – процессы и аппараты
химической технологии**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Минск, 1971

66

A-33

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский технологический институт
имени С.М. Кирова



На правах рукописи

В.Я. ЛЕВЕДЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ В
КОМБИНИРОВАННЫХ СУШИЛКАХ СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ.

О.5. 347 - процессы и аппараты химической технологии.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК.



Минск
1971

2596ap

Работа выполнена в Ивановском химико-технологическом институте.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

кандидат химических наук, доцент В.Н. КИСЕЛЬНИКОВ

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук В.В. СТРЕЛЦОВ

кандидат технических наук, доцент А.И. ЕРШОВ

Ведущее предприятие - Гродненский химический комбинат

Автореферат разослан " 3 " *август* 1971 г.

Защита состоится " 2 " *сентября* 1971 г.

на заседании Ученого Совета Белорусского технологического института имени С.М. Кирова (город Минск, ул.Свердлова, 13 а).

Просим Ваши отзывы по автореферату в двух экземплярах направлять в адрес Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ДОЦЕНТ

И.М.

И.М. ПЛЕХОВ

Химизация народного хозяйства в СССР сосредотачивает внимание науки и инженерной практики на создании прогрессивных, экономически выгодных технологических процессов и повышении интенсивности и эффективности оборудования, в частности сушильных аппаратов. Эта задача может быть решена путем разработки новых опособов сушки, усовершенствования существующих методов и конструкций сушильного оборудования.

В последние годы как в нашей стране, так и за рубежом получают распространение комбинированные сушильные установки с переменными тепловыми и гидродинамическими воздействиями на каждой ступени, различным образом сочетающие в себе режимы псевдоожиженного и фонтанирующего слоев, аэрофонтана, закрученного потока и пневмотранспорта.

Внедрение в химическую и смежные с ней отрасли промышленности этого нового прогрессивного метода дает возможность заменить периодические процессы непрерывными, сократить продолжительность обработки материалов путем применения более высоких скоростей материальных потоков и повышения температуры теплоносителя.

Вопросами комбинированной сушки материалов во взвешенном слое занимается в ряде институтов коллектив научных работников под руководством П.Г. Романкова и Н.Б. Рашковской, Н.И. Гельперина, Б.С. Сажина и М.В. Лыкова.

В результате рассмотрения литературных источников и проведенных лабораторных исследований на кафедре процессов и аппаратов Ивановского химико-технологического института было разработано несколько конструкций комбинированных сушилок, работающих по замкнутому циклу.

В качестве отдельных ступеней в этих сушилках использовались аппараты, в которых можно было создавать различные режимы

взвешенного олоя и обеспечивать оптимальные условия проведения процессов сушки. На разработанных установках были проведены лабораторные, полупромышленные и промышленные исследования процессов сушки различных высухих термолабильных материалов, таких как полимерных материалов акриловой группы, гидрохинона, сульфата аммония и др. При этом были получены положительные результаты и такие сушилки внедрены в производство.

Но более широкое внедрение таких сушилок в разнородные технологические процессы требует всесторонних научных исследований как в области тепло- и массообмена, так и гидродинамики. Эффективность того или иного метода сушки в значительной мере определяет гидродинамическая обстановка процесса, от которой зависят распределение концентраций твердой фазы, скорость потоков и время пребывания материалов в отдельных трактах сушилки.

В связи с этим были проведены исследования некоторых вопросов аэродинамики комбинированных сушилок, что позволит создать их обоснованный инженерный расчет.

Конструкция комбинированной сушилки.

Комбинированная сушильная установка состояла из пневмопитателя влажного материала, циклона, пневмопитателя подсушенного материала, пневмотрубы и сушилки с кипящим слоем, объединенных последовательно в единую замкнутую систему.

Работа установки заключалась в следующем: влажный материал через верхний пневмопитатель подавался отработанным сушильным агентом в циклон. В циклоне происходила подсушка и вымывание влажного материала с сухими частицами уноса, что препятствовало его ослизанию и комкованию. Вследствие этого материал приобретал хорошие сыпучие свойства, что необходимо для дальнейшей его обработки во

взвешенном слое. Подсушенный материал из циклона поступал в нижний пневмопитатель вместе с некоторым количеством отработанного сушильного агента. Степень рециркуляции можно было регулировать изменением размера сопла нижнего пневмопитателя. Остальное количество отработанного и охлажденного влажным материалом сушильного агента выбрасывалось в атмосферу.

Нижний пневмопитатель подавал подсушенный материал в пневмотрубу, которая олушила второй ступень установки, предназначенной для интенсивного удаления поверхностной влаги.

Из пневмотрубы материал подавался в сушилку с закрученным кипящим слоем. Закручивание слоя создавалось за счет тангенциального ввода материала и специальной конструкции газораспределительной решетки. Досушка продукта до стандартной конечной влажности обеспечивалась путем создания определенной высоты кипящего слоя.

Теоретическая часть

В отдельных ступенях комбинированных сушилок применяются различные аэродинамические режимы взвешенного слоя, рациональное сочетание которых обеспечивает активную аэродинамическую обстановку и определяет условия тепло- и массообмена процесса сушки. Эти режимы можно изменять в зависимости от свойств досушиваемых материалов и предъявляемых требований к качеству и конечной влажности продуктов. Переход одних режимов в другие обусловлен взаимодействием сил, создаваемых потоком газа и оказываемым сопротивлением слоя зернистого материала.

Для любого вида проточной дисперсной системы характерно наличие основного и принципиально нового по сравнению с однородными потоками параметра — концентрации твердой фазы, которая не прот-

равно изменяется при движении двухфазного потока по трактам комбинированной сушилки.

Для описания процессов гидродинамики в дисперсных потоках целесообразно применять теорию подобия, так как в этом случае, как отмечают С.Г.Телетов, Э.Р.Горбис и др., она является основным методом обобщения и анализа полученных результатов и позволяет сочетать теоретические и экспериментальные методы исследования.

При исследовании двухфазных потоков системы газ-твердые частицы в комбинированных сушилках с малым объемным содержанием твердой фазы и частичным переходом одной фазы в другую можно использовать теорему об изменении количества движения.

Эта теорема дает возможность найти соотношение между параметрами потока и связанными с ними силами.

I. Аэродинамика двухфазных потоков в горизонтальном пневмотранспорте

При горизонтальном пневмотранспорте частицы материала подвергаются действию сил, направленных вверх, вниз или под углом к направлению движения струи, а в массе частички будут перемещаться в пределах струи.

При этом лобовая аэродинамическая сила R действует перпендикулярно направлению силы тяжести G .

Движение частиц в направлении, перпендикулярном направлению транспортирования, ограничено стенками трубопровода. При этом частицы, наталкиваясь на стенки, отражаются от них. Вследствие ударов о стенки они теряют свою энергию, отталкиваясь уже с меньшей скоростью. При взаимном столкновении частиц происходит обмен количеством движения, более быстрые частицы затормаживаются, а

медленные ускоряются.

Для выделенного элементарного участка трубы объемом радиусом R и длиной dx с учетом фазового превращения можно записать:

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2\tau_{cm}}{R} = \varphi \rho_m \left(\frac{\partial U_m}{\partial t} + U_m \frac{\partial U_m}{\partial x} \right) + (1-\varphi) \rho_r \left(\frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_r}{\partial x} \right) + (U_r - U_m) \left(\frac{\partial}{\partial t} \varphi \rho_m + \frac{\partial}{\partial x} \varphi \rho_m U_m \right) \quad (1)$$

Используя методы преобразования дифференциальных уравнений с помощью теории подобия получаем обобщенную критериальную зависимость, характеризующую движение двухфазного потока в горизонтальной трубе.

$$\alpha = \frac{U_m}{U_r} = f(Re; A_v; \frac{d}{D}; \frac{\rho_m}{\rho_r}; M_p) \quad (2)$$

2. Аэродинамика двухфазных потоков в циклонных аппаратах

Характер движения двухфазного потока в циклонной камере в значительной мере определяется концентрацией твердой фазы: при повышенной концентрации пылевидные частицы после входа в циклон двигаются по стенке в виде жгута или ленты небольшой ширины, делающей несколько витков в аппарате. Условия движения частиц в жгуте отличны от условий движения одиночной частицы, так как наблюдается их взаимодействие, способствующее образованию жгута. При пониженных концентрациях взвеси движение твердых частиц становится свободными, т.е. частицы не оказывают влияния как на несущий их воздушный поток, так и друг на друга. При этих условиях существенное значение приобретают упругие силы удара частиц о стенки циклона, за счет которых они начинают двигаться по сложным ломаным (многоугольным) траекториям. На образование жгута оказывает влияние так же и вращательное движение самих

частиц. Траектория движения частиц в жгуте определяется взаимодействием аэродинамических сил, центробежных, тяжести, трения, упругих ударов частиц о стенку аппарата и друг о друга и др. Рассматривая пространственную картину движения жгута в циклоне можно записать:

относительно оси X:

$$(dP-dT)\cos\alpha\cos\gamma - dN\sin\gamma = \frac{1}{g}[(G_M-dG_M)(U_{Mx}+dU_{Mx}) + (G_r+dG_r)(U_{rx}+dU_{rx}) - G_M U_{Mx} - G_r U_{rx}] \quad (3)$$

относительно оси Y:

$$(dT-dP)\cos\alpha\sin\gamma - dN\cos\gamma\cos\beta = \frac{1}{g}[(G_M-dG_M)(U_{My}+dU_{My}) + (G_r+dG_r)(U_{ry}+dU_{ry}) - G_M U_{My} - G_r U_{ry}] \quad (4)$$

относительно оси Z:

$$dN\sin\beta - dG + (dT-dP)\sin\alpha = \frac{1}{g}[(G_M-dG_M)(U_{Mz}+dU_{Mz}) + (G_r+dG_r)(U_{rz}+dU_{rz}) - G_M U_{Mz} - G_r U_{rz}] \quad (5)$$

После преобразования уравнений (3,4,5) методами теории подобия получается ряд критериев подобия и параметрических критериев, зависящих друг от друга.

В конечном виде критериальное уравнение движения двухфазного потока в циклоне приобретает следующий вид:

$$\frac{l}{H} = f(A_\gamma; Re; F_{\gamma_4}; M_p) \quad (6)$$

где: l - длина траектории частиц в циклоне;

H - строительная высота аппарата;

$Re = \frac{U_{\gamma_4} D_k}{\nu}$ - критерий Рейнольдса;

$F_{\gamma_4} = \frac{U_{\gamma_4}^2}{g R_{cp}}$ - центробежный критерий Фруда .

3. Аэродинамическая очистка отходящих газов в комбинированных сушилках

Применение для сушки сыпучих материалов комбинированных сушилок, разработанных в ИХТИ, показало, что вопросы очистки отходящих газов при этом могут быть успешно решены в самом процессе сушки. При смешении воздуха, отходящего из аппарата с кипящим слоем и содержащего пылевидные частицы, с загружаемым влажным продуктом в верхнем пневмопитателе и циклоне происходит прилипание сухих частиц уноса к влажным частицам загружаемого продукта с образованием агрегатов, за счет чего к.п.д. пылеулавливания становится близким к 100%.

Режим движения в трубе пневмопитателя и циклоне, где происходит пылеочистка, можно рассматривать как режим взвешенного слоя с высокой порозностью ($\epsilon = 0,95 + 0,99$). В любом участке пневмопитателя на поток движущихся в беспорядке влажных частиц продукта набегает воздушный поток с частицами уноса из аппарата с кипящим слоем. Согласно принципа геометрического подобия Кавальери-Анера свободное пространство в любом сечении аппарата со взвешенным слоем пропорционально порозности, т.е.

$$F_{св} = \epsilon F_{сеч} \quad (7)$$

В результате такого рассмотрения задерживающую способность или к.п.д. очистки i слоями влажного материала, находящегося в трубе пневмопитателя и циклоне, можно выразить следующим уравнением:

$$\eta = 1 - \left[\epsilon - \frac{4d_p}{d} (1 - \epsilon) \left(1 + \frac{d_p}{d} \right) \right]^i \quad (8)$$

Число слоев влажного материала i определяется длиной трубы (L), размером влажных частиц d_p , и порозностью потока ϵ

$$i = \frac{L}{d \left(1 + \frac{d_p}{d} \right)} \quad (9)$$

Экспериментальная часть

Распределение концентраций твердой фазы в горизонтальном двухфазном потоке.

При горизонтальном пневмотранспорте концентрация твердой фазы в отдельных сечениях трубы становится неодинаковой. Твердые частички концентрируются в нижней части, а газ - в верхней части трубопровода.

Распределение твердой фазы по сечениям пневмопитателя определялось методом отсечек и улавливанием материала специальной многоярусной ловушкой с последующим взвешиванием продукта, собранного на каждом ярусе.

В результате исследований было выяснено, что при движении материала в горизонтальном трубопроводе наблюдается неравномерное распределение концентраций как по высоте сечения, так и по длине. Неравномерность распределения концентраций возрастает с увеличением производительности, размера и плотности частиц. Проведенные исследования показали, что наблюдается определенное отличие в распределении концентраций для разгонного и стабилизированного участков трубопровода. Неравномерность распределения концентраций для разгонного участка выражена слабее, чем для стабилизированного.

Фактор скольжения фаз

Экспериментальное определение скоростей потоков газа и материала было проведено в горизонтальном пневмопитателе, состоящем из сопла и трубопровода квадратного сечения, со стороной квадрата 55 мм.

Исследования двухфазных потоков проводились со следующими материалами: силикагелем цилиндрической формы ($h = 4$ мм, $d = 4$ мм), сульфетом аммония ($d = 1,0$ мм), гранулированной мочевиной ($d = 15$ и $2,0$ мм), смолой СГ - I ($d = 3,0$ мм).

Скорости частиц определялись двумя способами: фотографированием и отсчетами. Оба метода дали совпадающие результаты.

Определение средней скорости частиц способом фотографирования производилось по длине "блика" (\bar{l}) и времени экспозиции (\bar{T}) по уравнению:

$$\bar{U}_m = \frac{\bar{l}}{\bar{T}} \quad (I0)$$

Средняя скорость частиц при отсечке исследуемого участка рассчитывалась по формуле:

$$\bar{U}_m = \frac{G \bar{l}}{Q} \quad (II)$$

В результате исследования было выяснено, что частицы в трубе движутся неравномерно. В момент загрузки частицы в направлении оси трубы имеют нулевую скорость, а затем на расстоянии около 50 мм от среза сопла приобретают максимальную скорость. Далее по мере раскрытия струи газа, вытекающего из сопла, движение частиц замедляется и на расстоянии около 400-500 мм от среза сопла скорость частиц постепенно выравнивается.

При обработке опытных данных (по уравнению 2) была получена критериальная зависимость, описывающая движение двухфазного потока в горизонтальной трубе:

$$\alpha = \frac{U_m}{U_r} = 0,05 Re^{0,49} Ar^{-0,17} \left(\frac{d}{D} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_r} \right)^{-0,44} M_p^{-0,3} \quad (I2)$$

Уравнение (I2) проверено в пределах исследованных параметров

$$29300 \leq Re \leq 38500 ;$$

$$6,3 \cdot 10^4 Ar \leq 22; 5 \cdot 10^5,$$

$$0,195 \leq \mu_r \leq 0,855;$$

$$26 \leq \left(\frac{d}{D} \cdot \frac{v_m}{\rho_r} \right) \leq 84$$

Среднее расхождение экспериментальных данных и значений, рассчитанных по уравнению (12) составляет 13%.

Длина траектории частиц в циклонной камере

Исследования длины траектории жгута проводились с различными материалами: сульфатом аммония ($d = 0,51$ и $0,82$ мм), силикагелем цилиндрической формы ($h = 4$ мм, $d = 4$ мм), гранулированной мочевиной ($d = 1$ мм), полиметилметакрилатом ($d = 0,148$ мм), смолой СГ - I ($d = 1,5$ мм) при различных концентрациях указанных продуктов и входных скоростях воздуха. Длину жгута определяли визуально и фотографированием, а количество материала, находящегося в аппарате (удерживающую способность камеры) - методы отсечек, для чего установка была снабжена специальным отсекателем. При этом было выяснено, что различные материалы по разному двигаются в аппарате, а формирование жгута зависит от концентрации твердой фазы. При большой концентрации частички группируются в жгут, а при малой концентрации они двигаются по сложным траекториям. При малой концентрации частиц путь, проходимый ими достаточно велик, а при увеличении концентрации - резко уменьшается. На графике $\frac{L}{H} = f(\mu_r)$, построенном в логарифмической анаморфозе, наблюдается точка перегиба, соответствующая критическому состоянию, при котором поток частичек начинает формироваться в жгут. Визуальное наблюдение за движением материала в циклоне показало, что число витков жгута в циклоне высотой 1000 мм изменяется в пределах от 1 до 3 и становится значительно большим при разрушении жгута. На формировании жгута оказывает большое влияние и диаметр частиц: крупные частицы труднее собрать в жгут, чем более мелкие. Для этого требуется резкое увеличение

расходной концентрации.

При обработке результатов исследования (по уравнению 6) были получены зависимости, позволяющие рассчитать длину траектории частиц материала в циклоне.

Для устойчивого состояния жгута:

$$\frac{R}{H} = 0,275 Re^{0,11} F_{\gamma c}^{0,24} A_{\gamma}^{0,03} M_{\rho}^{-0,10} \quad (13)$$

для неустойчивого состояния жгута

$$\frac{R}{H} = 0,357 Re^{0,11} F_{\gamma c}^{0,18} A_{\gamma}^{0,02} M_{\rho}^{-0,18} \quad (14)$$

Уравнения (13) и (14) проверены в пределах значений

Re от $16 \cdot 10^3$ до $51 \cdot 10^3$; A_{γ} от 238 до $41 \cdot 10^3$; $F_{\gamma c}$ от 2,7 до 11;
 M_{ρ} от 0,85 до 3,37 кг/кг.

Среднее расхождение экспериментальных данных и рассчитанных значений составило:

по уравнению (13) - 5,2%; по уравнению (14) - 4,5%

В уравнения (13) и (14) критерий Архимеда входит в очень малых степенях. Поэтому для мелких частиц при $d < 0,1$ мм влиянием критерия Архимеда на длину траектории можно пренебречь, так как в этом случае этот член уравнения становится близким к единице и ошибка расчета в предельном случае не превышает 12%.

Совместным решением уравнений (13) и (14) была рассчитана критическая концентрация, соответствующая моменту разрушения жгута

$$M_{\rho r} = 12,7 F_{\gamma c}^{-0,7} A_{\gamma}^{-0,10} \quad (15)$$

Расчет критической концентрации по уравнению (15) показал расхождение от опытных значений в пределах $\pm 15\%$.

Пылеулавливание в комбинированной сушилке

Экспериментальная проверка процесса пылеулавливания в комбинированных сушилках при сушке различных продуктов как и

лабораторных, так и в промышленных установках показала, что при аэродинамическом методе достигается высокая степень очистки отходящего воздуха от пылевидных частиц. Содержание пыли в газе, отходящем из промышленных сушилок, характеризуется данными, приведенными в таблице.

Таблица

№ п/п	Наименование высушиваемого продукта	Средний размер частиц влажного продукта, мм	Содержание пыли в отходящем газе, мг/м ³
1	Смола СТ - I	2,16	следи
2	Смола "АС"	0,4	4+
3	Литьевой полимер	0,25	не более 10
4	Гидрохинон	0,15	не более 10
5	Сульфат аммония	0,26	2+ 4

Содержание пыли в газе, отходящем из сушилки, как это видно из таблицы удовлетворяет условиям, предъявляемым к предельному количеству выбрасываемой из сушилки пыли и свидетельствует о том, что при сушке сыпучих материалов в комбинированной сушилке не требуется установки каких-либо дополнительных очистных устройств. Более подробные исследования уноса пыли были проведены в лабораторной установке при сушке ПВХ ($d = 0,148$ мм). При исследовании пылеулавливания определялось количество пыли, уносимой из аппарата с кипящим слоем и из выхлопной трубы циклона. Экспериментальное определение количества пыли в этих точках производилось весовым путем при периодическим просасывании определенного объема запыленного воздуха через фильтр. Пределы размеров уносимых частиц определялись под микроскопом. Они составляли для сушилки с кипящим слоем 20 + 70 микрон, для циклона до 10 микрон. При содержании пыли в газе, отходящем из сушики с кипящим слоем до 6000 мг/м³, степень улавливания в верхнем пневмопитателе и

циклоне достигала практически 100% и потери продукта с отходящим газом не превышали $2 + 4 \text{ мг/м}^3$. Сопоставление опытных результатов с рассчитанными по уравнению (10) дало хорошее совпадение.

Из уравнения (10) видно, что уменьшение порозности потока ($\varepsilon = 0,97 + 0,96$), легко достигаемое увеличением производительности по загружаемому влажному продукту, приводит к быстрому возрастанию к.п.д. пылеулавливания.

Время пребывания материала в комбинированной сушилке

Время пребывания материала определяется размерами аппарата, аэродинамической обстановкой, создаваемой в каждой ступени, физическими свойствами и концентрацией твердой фазы в потоке.

Общее время пребывания материала в сушилке ($T_{\text{об}}$) зависит от времени пребывания частиц в отдельных ступенях:

$$T_{\text{об}} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (16)$$

где: T_1, T_2, T_3, T_4 - время пребывания материала соответственно в верхнем пневмопитателе, циклоне, нижнем пневмопитателе и сушилке с кипящим слоем.

Время пребывания продукта в пневмопитателях, которые можно рассматривать как аппараты полного вытеснения, определяется средней скоростью движения частиц, рассчитываемый по уравнению (12) и длиной трубопроводов. Опытные данные показывают, что скорость частиц различных материалов находится в пределах $1,5 + 4 \text{ м/сек}$ и составляет $0,1 + 0,3$ от скорости газа.

Время пребывания материала в циклоне зависит от длины траектории, рассчитываемой по уравнениям (13) и (14) и средней скорости частиц в аппарате. Проведенные исследования показали, что время пребывания материала в циклоне высотой 1000 мм изменяется незначительно и составляет $0,5 + 1 \text{ сек}$, а скорость движения

частиц колеблется в пределах $2 + 3,2$ м/сек. Расхождение экспериментальных данных и рассчитанных значений не превышает 18 %.

Определяющим весь сушильный процесс является среднее время пребывания материала в аппарате с кипящим слоем, которое определяется по весу слоя и производительности сушилки. Это время можно легко регулировать путем изменения высоты слоя материала и тем самым обеспечивать необходимую конечную влажность продукта.

Гидравлическое сопротивление комбинированной сушилки

Гидравлическое сопротивление является важной характеристикой комбинированной сушилки, определяющей ее экономические показатели. Необходимый напор на преодоление гидравлических сопротивлений зависит от сопротивлений отдельных узлов и обеспечивается двумя потоками воздуха: пот ком, поступающим в нижний пневмопитатель и потоком, подаваемым под решетку аппарата с кипящим слоем. Эти потоки смешиваются друг с другом в сушилке с кипящим слоем и направляются в верхний пневмопитатель и циклон. Поэтому для определения гидравлического сопротивления сушилки и выбора воздуходувки необходимо рассмотреть отдельно сопротивление этих потоков. Опытные данные, полученные на промышленных установках показывают, что гидравлическое сопротивление сушилки изменяется в пределах 600-850 мм.вод.ст. Сравнение опытных результатов с расчетными показывает их удовлетворительную сходимость.

Гидравлическое сопротивление циклона

Исследования гидравлического сопротивления циклона проводились как с однофазным, так и с двухфазным потоками. Обработка экспериментальных данных проводилась в виде:

$$E_{ц} = f(Re)$$

$$E_{цв} = f(Re; M_p)$$

- 16 -

где: $E_{ц}$, $E_{цв}$ - критерий Эйлера соответственно для одно и двухфазного потоков; $Re = \frac{U_{гс} D_{вх}}{\nu}$ критерий Рейнольдса, $D_{вх}$ - диаметр входного патрубка.

Сопротивление двухфазного потока отличается от однофазного как по абсолютной величине, так и характеру изменения. В случае двухфазного потока значительная доля энергии расходуется на вращение твердой фазы и ее транспортировку. Гидравлическое сопротивление двухфазного потока зависит от концентрации твердой фазы, влияние которой является весьма значительным.

При этом было выяснено, что с увеличением Re значения $E_{цв}$ возрастают, а при $Re \geq 10^5$ наступает автомодельный режим работы аппарата.

Полученные значения гидравлического сопротивления позволили установить для двухфазного потока следующую расчетную зависимость:

$$E_{цв} = 0,7 M_p^{0,14} \quad \text{при } M_p \leq 0,6$$
$$\text{и } E_{цв} = 0,68 \quad \text{при } 0,6 \leq M_p \leq 1,5$$

Проведенные исследования показали, что на изменение гидравлического сопротивления циклона не оказывает влияние диаметр, форма и плотность частиц. Сопротивление мало изменяется от влажности материала и температуры газового потока.

Гидравлическое сопротивление газораспределительных решеток

Потери напора газового потока в газораспределительных решетках обычно рассчитывают по уравнению Хумарка и О'Коннелла. Нами было разработано несколько конструкций газораспределительных устройств: беспровальная решетка с наклонными отверстиями

- 17 -

Институт химической технологии
имени С. М. НИРОВА

до 9557

и решетка с регулируемым живым сечением, предназначенные для создания закрученного кипящего слоя. Преимуществом этих решеток является небольшое гидравлическое сопротивление при хорошем качестве псевдоожижения и ликвидация застойных зон без затрат дополнительной энергии на привод решетки во вращательное движение или создание вибрации. Слой материала, находящийся на этой решетке легко отрывается на несколько мм от нее, что резко снижает опасность пригорания и заплавления отверстий решетки.

Были сопоставлены некоторые характеристики решеток с вертикально и наклонно расположенными отверстиями. Для сопоставления были выбраны решетки:

- а) с наклонными отверстиями ($\bar{b} = 6$ мм; $\varphi_{ж} = 6,85\%$, $\alpha = 20^\circ$)
- б) с вертикальными отверстиями: 1) $\bar{b} = 6$ мм; $\varphi_{ж} = 5,64\%$;
2) $\bar{b} = 11$ мм; $\varphi_{ж} = 5,64\%$).

Гидравлическое сопротивление решетки с наклонными отверстиями при одной и той же фиктивной скорости оказалось наименьшим.

При этом опытное гидравлическое сопротивление удовлетворительно согласуется с рассчитанными по формуле Хемарка и О'Коннелля, если при расчете за определяющий размер взять длину канала отверстий. Постоянный коэффициент в этом уравнении становится равным 0,315. Гидравлическое сопротивление слоя материала одинаковой высоты для решетки с наклонными отверстиями меньше сопротивления слоя при использовании решеток с вертикальными отверстиями. Но для момента перехода неподвижного слоя в псевдоожиженное состояние наблюдается более значительный пик в перепаде давления по сравнению с решетками с вертикальными отверстиями. Это объясняется тем, что в начальный момент псевдоожижения

требуется затратить больше энергии для сдвига материала и придания ему вращательного движения, чем для подъема при использовании обычной решетки.

Решетки с наклонными отверстиями для создания закрученного кипящего слоя были использованы нами в комбинированных промышленных сушильных установках и хорошо зарекомендовали себя в производстве.

Экономическое обоснование комбинированного метода сушки

Эффективность применения нового метода сушки была подтверждена технико-экономическими расчетами и сравнением затрат на комбинированную сушильную установку и вакуум - гребковую сушилку. Так, например, при промышленных испытаниях комбинированной сушилки для полиметилметакрилата было установлено, что производительность одной комбинированной сушилки с диаметром решетки 400 мм больше, чем производительность вакуум-гребковой сушилки с диаметром 1000 мм почти в 5 раз. Удельные капитальные вложения для комбинированной сушилки по сравнению с барабанной уменьшаются с 71,8 руб/т готового продукта до 4,35 руб/т, т.е. в 16,5 раз, соответственно резко снижаются годовые амортизационные отчисления, а также текущие расходы на содержание и ремонт оборудования; себестоимость сушки 1 т. продукта снижается с 30,7 руб/т до 15 руб/т, т.е. приблизительно в 2 раза.

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных лабораторных исследований и полупромышленных испытаний с учетом критического рассмотрения литературных источников и применяемых в настоящее время производственных методов сушки, создан новый высокоэффективный комбинированный способ сушки сыпучих материалов.

2. Разработан ряд конструкций многоступенчатых комбинированных установок и их узлов (питателей, решеток, циклонов), обеспечивающих создание различных режимов взвешенного слоя, — внемотранспорта, циклонного, аэрофонтанного, псевдооживленного и закрученного слоя, пригодных для проведения механизированного и автоматизированного процесса сушки сыпучих продуктов при активных гидродинамических и тепловых режимах в отдельных ступенях.

3. Показано, что наиболее целесообразной конструкцией комбинированной сушилки является установка, работающая по закольцованной схеме.

4. Разнообразные модификации взвешенного слоя, использованные в комбинированной сушилке, рассмотрены с позиции уравнения об изменении количества движения, что позволило получить, расчетные уравнения для определения коэффициента скольжения фаз в горизонтальном пневмопитателе, длины траектории жгута материала в циклоне и времени пребывания продукта в этих ступенях сушилки.

5. С целью создания обоснованного инженерного расчета комбинированных сушилок проведены всесторонние исследования гидродинамики отдельных узлов сушилок.

6. Исследовано распределение скоростей и концентраций твердой фазы в горизонтальном пневмопитателе как по его сечению, так и по длине.

7. Рассмотрен механизм процесса образования жгута материала в циклоне. Выяснены условия, при которых он образуется и показано, что его распад происходит при определенной критической концентрации твердой фазы.

8. Рассмотрен механизм процесса аэродинамической очистки пыли в пневмопитателе и циклоне. Получено расчетное уравнение

для определения коэффициента полезного действия циклона. Показано, что аэродинамический метод очистки является довольно эффективным и он позволяет проводить процессы сушки сыпучих материалов в комбинированных сушилках без установки дополнительных очистных устройств.

9. Получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления комбинированной сушилки. Сопоставление расчетных данных с опытными, полученными на лабораторной и промышленных установках показало их хорошее совпадение.

10. Внедрен в промышленное производство комбинированный способ сушки литьевого полимера (полиметилакрилата), смолы "АС", амида метакриловой кислоты и других продуктов.

11. Проведено экономическое сравнение комбинированного метода сушки для ряда продуктов с сушкой их в барабанных и полочных сушилках и с установками с кипящим слоем. Экономическим анализом, включающим оценку качества получаемых продуктов, удельные расходы тепла и воздуха, расходы на амортизацию, эксплуатационные расходы и т.д., показана эффективность комбинированного метода сушки перед остальными.

Обозначения

U, V, U_r, U_g - соответственно скорости и веса материала и газа;
 $\varphi, \varphi_p, \varphi_{кр}$ - объемная, расходная и критическая концентрация;
 ρ_n, ρ_g - плотности материала и газа; $T_{ем}$ - касательное напряжение;
 α - фактор скольжения фаз; T, P - силы трения и давления; N - нормальная сила давления; a - ускорение свободного падения; α, γ - углы наклона траекторий движения частиц, β - угол раскрытия конуса; $F_n, F_{об}$ - площади свободного и общего сечения аппарата с вращенным слоем; ϵ - порозность потока; d_p - диаметр частиц,

уносимых из аппарата с кипящим оловом; Q - удерживающая способность камеры; G - производительность аппарата;

Содержание диссертации изложено в следующих работах

1. Кисельников В.Н., Романов В.С., Лебедев В.Я., Вялков В.В., Штефан В.Н., Варламов В.И. "Способ сушки сыпучих материалов", Авт. свид. СССР № 259700, Бюлл. изобр. № 2, 1970.

2. Кисельников В.Н., Вялков В.В., Лебедев В.Я., Романов В.С., Курьгин В.А., Опыт промышленного внедрения комбинированного метода сушки полиметилметакрилата (дитьевого полимера). Изв. выш. учебн. заведений. Химия и химическая технология, № 5, XII, 1969, стр. 676-681.

3. Кисельников В.Н., Вялков В.В., Лебедев В.Я., Романов В.С., Комбинированная сушка сыпучих материалов. Труды Ивановского химико-технологического института, № IX, 1968, стр. 135-140.

4. Кисельников В.Н., Вялков В.В., Романов В.С., Лебедев В.Я., Питатели для лабораторных сушилок с взвешенным оловом, об. "Техника сушки во взвешенном слое", вып. 3. ЦИНТИХимнефтемаш, 1966, стр. 23-31.

5. Кисельников В.Н., Лебедев В.Я., Вялков В.В., Романов В.С. Исследование аэродинамики двухфазных потоков в циклонных аппаратах". Труды Ивановского химико-технологического института № 12, 1971 г.

6. Романов В.С., Кисельников В.Н., Вялков В.В., Лебедев В.Я., Комбинированная сушка термочувствительных материалов в закрученном потоке, тезисы докладов научной конференции ИХТИ, 1966, стр. 159-160.

7. Кисельников В.Н., Лебедев В.Я., Романов В.С., Вялков В.В., "Исследование гидродинамики, тепло- и массообмена двухфазных потоков в горизонтальном пневмопитателе. Краткие доклады Всесоюзного научно-технического совещания по исследованию процессов тепло- и массообмена в кипящем слое. Иваново, 1969, стр. II3-II4.

8. Лебедев В.Я., Кисельников В.Н., Вялков В.В., Романов В.С., Питатели для исследования процессов сушки материалов во взвешенном слое, тезисы докладов научной конференции ИХТИ, 1966, стр. 164-165.

9. Кисельников В.Н., Лебедев В.Я., Романов В.С., Вялков В.В., Барулин Е.П., Корочкин В.А., Исследование аэродинамики двухфазных потоков в горизонтальном пневмопитателе. Труды Ивановского химико-технологического института, вып. 12, 1971 г.

10. Кисельников В.Н., Вялков В.В., Лебедев В.Я., Романов В.С., К расчету комбинированной сушилки со взвешенным слоем, сб. "Техника сушки во взвешенном слое", вып. 5, ЦИНТИХимнефтемаш, 1966, стр. 24-29.

11. Вялков В.В., Кисельников В.Н., Романов В.С., Лебедев В.Я., Комбинированная сушка сыпучих материалов во взвешенном состоянии, тезисы докладов научной конференции ИХТИ, 1966, стр. 161-162.

12. Кисельников В.Н., Вялков В.В., Романов В.С., Лебедев В.Я., Опыт промышленного внедрения комбинированной сушилки со взвешенным слоем. Тезисы докладов научной конференции ИХТИ, 1967, стр. 242-243.

13. Кисельников В.Н., Вялков В.В., Лебедев В.Я., Романов В.С., Исследование процесса сушки сыпучих материалов в комбинированных сушилках и методы их расчета. Краткие доклады Всесоюзного научно-технического совещания по исследованию процессов тепло - и

массообмена в кипящем слое, Иваново, 1969, стр. 5-6.

14. Кисельников В.Н., Круглов В.А., Лебедев В.Я., Вялков В.В., Аэродинамическая очистка отходящих газов в комбинированных сушилках. Труды Ивановского химико-технологического института. Вып. 12. 1971.

15. Кисельников В.Н., Вялков В.В., Лебедев В.Я., Романов В.С., Комбинированная сушка сыпучих материалов и опыт промышленного внедрения, материал Всесоюзной научно-технической конференции по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки, Москва, 1969, вып. П. стр. 122-125.

Материалы диссертации докладывались на научных конференциях ИХТИ в 1966-1971 гг., Всесоюзном научно-техническом совещании по исследованию процессов тепло- и массообмена в кипящем слое, Иваново, 1969, Всесоюзном научно-техническом совещании и по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки. Москва, 1969 г.

**ЛТ 03157, вак.164, тир.150 экз, 25.3.71г. ИТИ им. С.М.Кирова
г.Иванов, ул.Овердлова, 13.**