

Министерство Высшего и Среднего Специального Образования Республики Узбекистан

Ташкентский Государственный Технический Университет им. А. Р. Беруни



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам по курсу

**«ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ
ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ»**

Методические указания к лабораторным работам посвящены изучению процессов, протекающих в промышленных тепло-технологических установках, которые включены в программу курсов «Тепло-массообменные и холодильные установки» и «Промышленные тепломассообменные процессы и установки».

Работа предназначена студентам очного, вечернего и заочного обучения специальности «Промышленная теплоэнергетика».

Составители: Бадалов А. А.
Шоисламов А. Ш.
Якубов С. И.

Кафедра : «Промышленная Теплоэнергетика»

Ташкент 2003

Настоящие методические указания предназначены для студентов специальности «Промышленная теплоэнергетика» и охватывают основные разделы курсов «Тепломассообменные и холодильные установки промышленных предприятий», «Расчет и проектирование тепломассообменных установок промышленных предприятий», «Изготовление, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок промышленных предприятий», которые являются профилирующими для указанной специальности. Методические указания содержат теоретические основы, описание и методику выполнения лабораторных работ.

Целью лабораторных работ является закрепление и углубление теоретических знаний студентов, изучение методики их проведения и получения практических навыков лабораторных исследований с умением анализировать результаты эксперимента. В лаборатории тепломассообменных и холодильных установок кафедры «Промышленная теплоэнергетика» есть ряд действующих типовых агрегатов и машин, позволяющих практически изучать тепломассообменные процессы, конструкцию и технику обслуживания теплоиспользующих установок, а также определять основные характеристики и устанавливать факторы, влияющие на производительность и тепловую экономичность промышленных объектов.

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, проработавшие соответствующий раздел теоретического курса по рекомендуемым учебным пособиям, а также подробно ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями и прошедшие инструктаж по технике безопасности.

После выполнения работы студенты должны составить отчет, который после получения зачета по лабораторному практикуму сдается преподавателю.

Отчет по выполненной работе включает:

I. Принципиальную схему установки;

- II. Протокол записи показаний измерительных приборов;
- III. Обработку результатов опыта;
- IV. Анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 1

Определение физико-химической температурной депрессии растворов.

(Продолжительность лабораторного занятия 2 часа)

Цель работы:

Задачей работы является опытное определение температуры кипения и физико-химической температурной депрессии водного раствора хлористого кальция (CaCl_2), при различном давлении паров растворителя.

Известно, что температура кипения раствора твердых веществ обычно выше температуры кипения чистого растворителя при том же давлении. При кипении в сосуде над раствором образуется пар чистого растворителя с температурой, равной температуре насыщения чистого растворителя при давлении в этом сосуде. Разность между температурой кипения раствора и температурой выделяющихся из раствора паров называется физико-химической температурной депрессией. Таким образом:

$$\Delta t = t - t_0 \quad (1-1)$$

Где: Δt - физико-химическая температурная депрессия, °С;
 t - температура кипения раствора, °С;
 t_0 - температура кипения растворителя, °С.

Физико-химическая температурная депрессия различна для разных растворов. Для раствора одного и того же вещества физико-химическая температурная депрессия увеличивается с повышением его концентрации. Под концентрацией раствора понимают от-

ношение массы сухого вещества в растворе к общей массе раствора в процентах:

$$b = \frac{G_{\text{сух}}}{W + G_{\text{сух}}} 100\% \quad (1-2)$$

где: b – массовая концентрация раствора, %;

$W_{\text{сух}}$ – количество растворителя, кг;

$G_{\text{сух}}$ – масса сухого вещества в растворе, кг.

Физико-химическая температурная депрессия для различных растворов определяется из справочников. Справочные данные относятся к условиям кипения жидкости при атмосферном давлении. На практике выпаривание осуществляется при различных давлениях и под вакуумом. В таких случаях расчётная физико-химическая температурная депрессия может быть вычислена по приближенной формуле И. А. Тищенко:

а) в технической системе

$$?1' = 0,003872Д1(T?/r) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-3)$$

б) в системе СИ

$$?1' = 16,2 Д1(T?/r) \text{ } ^\circ\text{C}$$

где: $?1$ - физико-химическая температурная депрессия при данном давлении, $^\circ\text{C}$;

$Д1'$ - физико-химическая температурная депрессия при нормальном давлении $P = 760$ мм. рт. ст., $0 \text{ } ^\circ\text{C}$;

T – абсолютная температура давления кипения воды при данном давлении, $^\circ\text{K}$;

R – теплота парообразования воды при данном давлении, ккал/кг, кДж/кг .

Описание Установки

Опытная установка (рис. 1-1) состоит из колбы (1), куда заливается исследуемый раствор. В колбе установлены два термометра (2) и (3), которые измеряют температуру раство-

ра и насыщенного пара. Раствор в колбе подогревается при помощи электронагревателя (4).

Пар, образующийся в колбе при кипении раствора, поступает в холодильник (5), полностью конденсируется и собирается в колбу (6). Для определения давления в системе служит дифманометр (7), а для его регулировки служит водоструйный насос (8).

Последовательность выполнения работы

1. Проверка состояния прибора.
2. В присутствии старшего лаборанта включается в сеть электронагреватель и вакуумнасос.
3. Вакуумнасосом создаётся наибольшее разрежение в системе и доводится до кипения находящийся в колбе раствор.
4. При кипении производятся замеры показаний термометров, которые заносятся в таблицу ($t_{\text{кип}}$ раствора; $t_{\text{нас}}$ пара).
5. Медленным закрытием крана вакуумнасоса в несколько приёмов уменьшают разрежение в системе до минимума, раствор доводят до кипения, замеряют показание термометров и заполняют соответствующие графы протокола наблюдения.
6. Отключают электронагреватель. Постепенно охлаждают раствор и постепенно увеличивают разрежение в приборе (повторяют опыт в обратном порядке).
7. Концентрацию раствора до и после опыта определяют титрованием не менее двух раз. Результаты замеров при установленном процессе заносят в протокол наблюдения.
8. Пользуясь формулой Тищенко И.А. вычисляют приближенное значение температурной депрессии и устанавливают расхождение между опытным и вычисленным.
9. На основании полученных результатов строят графики:
 - а) температурная депрессия – давление;
 - б) температура кипения – давление.
10. Сравнивают полученные данные с табличными (табл. 9-2, -2).

| № | P | t | | Д | Д ₁ |
|---|---|---|--|---|----------------|
|---|---|---|--|---|----------------|

| п/п | мм. рт.стб. | кип. раств. | Насыщ. пара | опытные | вычисленные |
|-----|-------------|-------------|-------------|---------|-------------|
| | | | | | |

Литература:

- 1 А. Г. Касаткин "основные процессы и аппараты химической технологии", М., "Химия", 1971г., стр. 367-402.
- 2 Теплотехнический справочник. Т. 2, 1976г., стр.597.

Лабораторная работа № 2

Изучение кинетики сушки зернистых материалов в псевдооживленном слое

(Продолжительность лабораторного занятия 4 часа)

Цель работы:

Ознакомление с работой сушилки, определение основных характеристик процесса и зависимости скорости от влагосодержания материала и нахождения константы К сушильного процесса.

Одним из распространённых способов удаления влаги из влажного материала является сушка его в потоке нагретого воздуха. При соприкосновении влажного материала с нагретым воздухом начинается испарение влаги с поверхности этого материала, и образующийся пар диффундирует через пограничный слой в окружающий воздух. В материале возникает разность концентрации влаги, и она начинает пе-

ремещаться из внутренних слоёв к поверхности. Пока влага из внутренних слоёв подводится в количестве, достаточном для полного смачивания поверхности, скорость сушки остаётся постоянной и не зависит от влагосодержания материала при постоянстве условий сушки: температуры воздуха, его скорости, направления и влагосодержания. В течении периода постоянной скорости процесс сушки определяется главным образом скоростью диффузии испарённой влаги через пограничный слой воздуха, т.е. внешними условиями. Поэтому этот период называют периодом «Внешней диффузии». На рис. 2-1 он характеризуется участком 1. Так как в случае воздушной сушки тепло к влажному материалу подводится только через поверхность, с которой испаряется влага, то в течении периода постоянной скорости сушки температура материала приблизительно равна температуре мокрого термометра. Когда количество влаги, подводимой к поверхности испарения, становится меньше, чем может испариться, тогда скорость сушки начинает падать. Период падающей скорости сушки продолжается до тех пор, пока материал не достигнет равновесного влагосодержания. В период падающей скорости сушка зависит главным образом от скорости, с которой влага диффундирует к поверхности материала, т.е. обуславливается «внутренней диффузией». Скорость внутренней диффузии зависит от структуры материала и его температуры и мало зависит от внешних условий процесса. На рис 2-1 период падающей скорости характеризуется участками (2) и (3).

Испарение с ненасыщенной поверхности непосредственно критическим влагосодержанием наступает тогда, когда на поверхности материала начинают появляться сухие участки *островки* и хотя скорость сушки со смоченной поверхности приводит к общему падению скорости сушки. Скорость сушки в течении этого периода пропорциональна содержанию влаги в материале. Так как влагосодержание материала продолжает убывать, то в конце концов наступает момент, когда вся влага на поверхности спарилась и процесс сушки начинает зависеть только от скорости, с которой влага диффундирует к поверхности. Этот период характеризуется участком (3) на рис 2-1. Для различных материалов вид кривой скорости сушки в этом периоде может быть различным, он зависит от физического периода высушиваемого материала и от условий сушки.

В период падающей скорости сушки температура материала становится выше температуры мокрого термометра и при достижении материалом равновесного влагосодержания становится равной температуре воздуха.

Период постоянной скорости сушки.

В течении периода постоянной скорости сушки испарение влаги с поверхности влажного материала, как отмечалось выше, равно скорости, с которой влага диффундирует через плёнку насыщенного воздуха. При выводе основного уравнения для скорости испарения можно считать, что скорость испарения пропорциональна разности концентраций пара у поверхности испарения F , т.е.

$$\frac{dU}{dr} = \beta \cdot \Delta C \cdot F \quad (2-1)$$

где: $\hat{\alpha}$ – коэффициент испарения, учитывающий аэродинамические условия испарения и физические свойства жидкости, м / сек.

Продолжительность периода постоянной скорости сушки может быть определена по уравнению:

$$\tau_1 = \frac{1}{k} \ln \frac{U'_n - U'_{кр}}{U'_{кр} - U'_p} \quad (2-2)$$

где: k – константа скорости процесса сушки, 1 / сек.

U'_n ; $U'_{кр}$; U'_p – начальное, критическое и равновесное влагосодержание материала, %.

Период падающей скорости сушки

Скорость внутренней диффузии зависит от структуры материала физико-химических свойств жидкости и температуры материала. Влага внутри твёрдого материала перемещается как в виде жидкости, так и в виде пара под действием капиллярных сил.

Ввиду чрезвычайно большого количества факторов, о которых зависит скорость процесса сушки в период падающей

щей скорости, математическое описание его чрезвычайно сложно. Продолжительность периода падающей скорости сушки можно определить в большинстве практических случаев только по экспериментальным данным. В технических расчётах можно допустить, что скорость сушки характеризуется прямолинейной зависимостью, начиная от критического влагосодержания (рис 2-1).

В этом случае продолжительность периода падающей скорости сушки можно определить по приближенному уравнению:

$$\tau_2 = \frac{I'_{кр} - I'_p}{k} 2,5 \lg \frac{I'_{кр} - I'_p}{I'_{кон} - I'_p} \quad (2-3)$$

здесь: $I'_{кон}$ – конечное влагосодержание материала, %.

Разнообразие свойств материалов, подвергающихся сушки, вызывает необходимость создания различных конструкций сушильных аппаратов. На многих производствах для интенсификации ряда технологических процессов при взаимодействии твердой дисперсной и газовой фаз, используют установки взвешенного (кипящего, псевдооживленного) слоя. К таким процессам относится и процесс сушки во взвешенном слое, являющийся достаточно простым при малых габаритах аппарата.

Установки для сушки материалов в кипящем слое могут работать как в периодическом, так и в непрерывном режимах. При периодическом процессе влажный материал загружают одновременно в аппарат, высушивают до заданного влагосодержания, после чего выгружают из аппарата. Такой режим процесса применяют в малотоннажных производствах.

По физической схеме взаимодействий влажной частицы с потоком сушильного агента. Сушка в кипящем слое является разновидностью процесса конвективной сушки. Обезвоживание отдельной частицы может идти как в период постоянной, так и период падающей скорости сушки.

При работе по непрерывной схеме, вследствие интенсивного перемещения материала в кипящем слое, разные его порции находятся в зоне сушки различное время и, следовательно, частицы выгружаемого материала имеют различное содержание влаги (от влагосодержания исходного материала до влагосодержания равновесного с параметрами сушильного агента). Неравномер-

Лабораторная работа № 3

Изучение процесса тепломассообмена между воздухом и водой в скруббере с кипящим слоем.

(Продолжительность лабораторного занятия 4 часа)

Цель работы:

- I. Изучение процессов тепло - и массообмена между воздухом и водой.
- II. Составление уравнения теплового баланса скруббера, при различных плотностях орошения насадки.
- III. Построение кривой псевдооживления.
- IV. Построение кривой изменения состояния воздуха при тепло - и массообмене с водой в скруббере в *i-d* диаграмме.

Насадочные колонны, в том числе и скрубберы с кипящим слоем, относятся к диффузионным аппаратам, в которых соприкосновение газов с жидкостью происходит на смоченной поверхности насадки. Насадка характеризуется поверхностью в единице объема m^2/m^3 , свободным объемом m^3/m^3 , линейными размерами одного его элемента. В опытном скруббере насадкой служат полиэтиленовые шарики: $d=2$ мм.

1. В процессе охлаждения или нагрева воздуха в скруббере одновременно с конвективным переносом тепла происходит конденсация пара из воздуха или испарение воды в воздух, т.е. с изменением температуры воздуха t , изменяется и его влагосодержание. Поэтому при составлении уравнения теплового баланса скруббера, целесообразно использовать энтальпию воздуха:

$$I_1 = I_{1\text{сух}} + 0,001d_1I_n \quad (3-1)$$

где: $I_{1\text{сух}}$ – энтальпия сухого воздуха при температуре t_1

I_n – энтальпия нагретого водяного пара при температуре t

В технических расчётах формулу (3-1) обычно заменяют приближенной зависимостью:

$$I_1 = t_1 + 0,001 d_1(2493 + 1,97t_1) \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}_{\text{сух.возд.}}} \right], \quad (3-2)$$

2. Построение кривой изменения состояния воздуха при его взаимодействии с водой по опытным данным проводится графо-аналитическим способом на основе уравнения теплового баланса (3-3).

На *i-d* диаграмме (рис. 3-1) отмечается положение точки А, соответствующей начальным параметрам воздуха t'_1 и I_1

t'_1 – соответствует показаниям термомпары 7, (рис 3-2).

I_1 – энтальпия воздуха на входе в скруббер, соответствует показаниям мокрой термомпары 8, (рис 3-2).

На линии $\varphi = 100\%$ отмечаются положения точек С и Д, соответствующие изотермам t'_2 и t''_2 , численно равные начальной и конечной температурам воды. Поскольку на лабораторном стенде осуществлён противоток, начало процесса смещения воздуха с водой на диаграмме изображается прямой АД, соединяющей точку А, характеризующую состояние воздуха на входе в скруббер, с точкой Д на линии $\varphi = 100\%$, которая соответствует температуре воды на выходе из скруббера t''_2 . Далее на этой прямой принимается значение промежуточной энтальпии $I_{\text{пр}}^\alpha$, которая определяется из уравнения теплового баланса:

$$L \cdot I_1 + G \cdot c_p \cdot t_{\text{пр}}^\alpha = L \cdot I_{\text{пр}}^\alpha + G \cdot c_p \cdot t''_2 \quad (3-3)$$

Где: L – расход воздуха, кг/с;

I_1 – энтальпия воздуха на входе в скруббер, Дж/кг;

c_p – теплоёмкость воды при заданной температуре, Дж/кг·град;

G – расход воды, кг/с;

t''_2 – температура воды на выходе из скруббера, °С;

I_{np}^{α} - энтальпия влажного воздуха в сечении, где установлена термопара 2;

t_{np}^{α} - температура, замеряемая термопарой 2.

Отсюда:

$$I_{np}^{\alpha} = I_1 - \frac{G \cdot c_p (t_2 - t_{np}^{\alpha})}{L} \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] \quad (3-4)$$

Затем в I-d диаграмме отмечают известную температуру на кривой насыщения $\varphi = 100\%$.

Находят точку пересечения полученной энтальпии I_{np}^{α} и прямой АД. Точку А соединяют с найденной на линии $\varphi = 100\%$ точкой, соответствующей t_{np}^{α} , на этой прямой отмечается промежуточное значение энтальпии воздуха I_{np}^{ϵ} , которое определяется по формуле:

$$I_{np}^{\epsilon} = I_{np}^{\alpha} - \frac{G \cdot c_p (t_{np}^{\alpha} - t_{np}^{\epsilon})}{L} \quad (3-5)$$

Таким образом, вычисляется ряд значений I_{np} и строится ряд прямых до тех пор, пока t_{np} не станет равной t_2 . Построенную таким образом по опытным данным кривую следует сравнить с кривой на I-d диаграмме.

3. Значение коэффициента теплоотдачи от воздуха к воде в насадочном скруббере может быть определено из уравнения:

$$\alpha = \frac{Q}{S \cdot \Delta t \cdot \varphi \cdot V} \quad [\text{Вт/м}^2\text{град}] \quad (3-6)$$

Q – количество тепла, передаваемое в скруббере, Вт;

V – активный объем скруббера измеряем по высоте кипящего слоя насадки;

S – поверхность насадки в единице объема, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

φ – коэффициент смачиваемости;

Δt – средняя разность температур теплоносителя и воздуха определяется по уравнению. (3-7)

$$\Delta t = \frac{1}{\sum \frac{b}{\Delta t_{np}}}$$

b – отношение изменения температуры воздуха в ступени к полному изменению ее в скруббере;

Δt_{np} - разность температур между теплоносителями для одной ступени.

Описание лабораторной установки и методика проведения эксперимента.

Лабораторная установка (рис 3-2) представляет собой стеклянную трубу, заполненную до определенной высоты полиэтиленовыми шариками. Вентилятором (1) из помещения в скруббер (12) нагнетается воздух, который нагревается в электронагревателе (4). Взаимодействие воздуха и воды осуществляется в режиме противотока в кипящем слое. Вода подается в верхнюю часть скруббера и посредством разбрызгивающего устройства смачивает полиэтиленовые шарики.

Расход воздуха определяется при помощи трубки Пито (3). Для этого необходимо определить скорость движения газа трубками Пито, которое сводится к измерению динамического давления потока. Оно равно разности полного и статического (P_n и P_c) давлений и связано со скоростью соотношением, полученным из уравнения Бернулли:

$$P_n - P_c = \frac{\gamma_1}{2g} \omega^2 \quad (3-8)$$

$$\text{Откуда:} \quad \omega = \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} (P_n - P_c)} \quad (3-9)$$

Где: ω – скорость движения жидкости или газа, м/сек;

γ – удельный вес протекающей жидкости или газа, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/сек²;

P_n – полное давление, кг/м²;

P_c – статическое давление, кг/м?

Разность давлений в микроманометре равна:

$$P_n - P_c = h(\gamma_n - \gamma') \quad (3-10)$$

отсюда скорость потока будет равна:

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} h(\gamma_n - \gamma')} \quad (3-11)$$

где: h – разность уровней рабочей жидкости в микроманометре, мм.вод.

γ_n – удельный вес рабочей жидкости в микроманометре, г/см?

γ' – удельный вес вещества над рабочей жидкостью, г/см?

Для определения расхода необходимо знать среднюю скорость потока ω , т.е. скорость, которая будучи умножена на площадь сечения трубопровода F дает количество воздуха, проходящего по трубопроводу в единицу времени;

$$Q = F\omega = \pi R^2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \cdot h(\gamma_n - \gamma')} \quad (3-12)$$

где: πR^2 – площадь сечения трубопровода, м?

ω – скорость потока, м/сек;

$\pi = 3.14$; $g = 9.81$ м/сек; $\gamma_n = 1,29$ кг/м?

Расход воды устанавливается вентилем (14) и определяется ротаметром РС-3 по тарировочной кривой

Температура воды по высоте насадки измеряется хромель-копелевыми ХК термопарами, в точках 1 и 2, а на входе и выходе из скруббера – термопарами 3 и 4 фиксируется при помощи потенциометра марки КСП-4.

Термопарами (7) (сухой термометр) и (8) (мокрый термометр) измеряется температура и влажность воздуха на входе в скруббер, термопарами (5) и (6) – температура и влажность воздуха на выходе из него.

А при помощи водяного дифманометра определяем ΔP – перепад давлений, соответствующий сопротивлению

слоя самой насадки в скруббере. Для этого необходимо снять крышку с входного воздушного патрубка, открыть заслонку (2), включить вентилятор (I). Для этого поставить тумблер Т2 на щите управления ЛАТРе Т в положение «вкл» и вращением ручки ЛАТРа увеличивать напряжение в цепи электрического нагревателя.

За работой нагревателя следить по показаниям амперметра и вольтметра (предельно допустимые $U = 200$ В, $I = 6$ А).

С помощью вентилятора (14), которым регулируется расход воды (при снятии показаний приборов расход воды следует держать постоянным по ротаметру РС-3 (13)), подать воду в верхнюю часть скруббера. При этом нужно открыть вентиль (15) и по показанию уровнемера (16) установленного по корпусу скруббера, следить за тем, чтобы уровень воды был ниже риски, иначе вода может попасть а проходное отверстие для воздуха и далее в калорифер, в результате может произойти короткое замыкание.

Включить потенциометр (8) КПС-4 и следить за его показаниями. При постоянном расходе воздуха и при трёх различных расходах воды после достижения установившегося режима (по показаниям термопар) снять показания приборов и записать их в журнал наблюдений.

После окончания опытов отключить потенциометр, электронагреватель, отключить подачу воды, для чего закрыть кран (14). Через 5 минут после того, как охладится установка, включить вентилятор.

Обработка результатов опытных данных

1. Протокол наблюдений и результатов обработки опытных данных, представленных в виде:

- уравнения теплового баланса скруббера, составленного с использованием измеренных в опыте параметров;
- таблица прихода и расхода тепла, рассчитанные на основе уравнения теплового баланса скруббера для каждого режима с указанием раз-небаланса ΔQ в процентах;
- кривой изменения температуры воздуха при тепло- и массообмене с водой в скруббере, построенной в I-d диаграмме;

г) основные расчетные зависимости, использованные при обработке опытных данных и проделанные расчёты.

2. Краткий анализ сущности изученных процессов и объяснение полученных результатов.

3. Оценку погрешности определяемых косвенным путем расхода воздуха и промежуточного значения энтальпии I при построении кривой тепло - и массообмена.

Литература:

1. Лебедев П. Д. Тепломассообменные, сушильные и холодильные установки. Москва, «Энергия», 1972

Лабораторная работа № 4

Изучение гидродинамики псевдооживленного слоя.

Цель работы:

Получение зависимости $\Delta P_{сл}$ от скорости газа U , определение критической скорости газа $W_{кр}$ и нахождение диаметра частиц d . Кроме того определяют: вес слоя $G_{сл}$ и расход $W_{ун}$, при котором начинается унос твердых частиц из аппарата.

В настоящее время ряд процессов химической технологии, при котором должно происходить взаимодействие газа или жидкости с мелкораздробленным твердым материалом (сушка, обжиг, адсорбция, каталитические процессы) осуществляют в аппаратах с так называемым (кипящим, псевдооживленным) слоем. В таких аппаратах указанные процессы значительно ускоряются. Если через неподвижный слой частиц, лежащих на решетке, пропустить снизу вверх поток газа (или жидкость) и при этом постепенно увеличи-

вать его скорость, то при некоторой скорости газа, так называемой критической, весь слой твердых частиц переходит во взвешенное состояние. Такой расширившийся взвешенный слой, в котором происходит интенсивное перемешивание твердых частиц, во многом напоминает кипящую жидкость, он «течет», принимает форму сосуда, имеет поверхность, через него пробулькивают пузырьки газа; поэтому его называют часто кипящим или псевдооживленным слоем. При дальнейшем увеличении скорости газа, продолжается расширение взвешенного слоя. Наконец, при некоторой скорости газа, называемой скоростью уноса, взвешенный слой разрушается – твердые частицы уносятся из аппарата потоком газа – происходит их пневмотранспорт.

Если измерить дифференциальным манометром величину $\Delta P_{сл}$, то есть падение давления газа при прохождении его через слой, то можно построить график зависимости $\Delta P_{сл}$ от так называемой фиктивной (условной) скорости W , отнесенной к полному поперечному сечению аппарата, а кривая будет иметь вид, показанный на рис 4-1. Фиктивная скорость расхода определяется по уравнению расхода:

$$W = \frac{V_{сек}}{S}, \quad (4-1)$$

где: $V_{сек}$ – расход газа, м³/сек;

S – площадь поперечного сечения, м².

В области существования взвешенного слоя, начиная от критической скорости газа $W_{кр}$ до скорости уноса $W_{ун}$, величина $\Delta P_{сл}$ сохраняет постоянное значение. Переход твердых частиц неподвижного слоя во взвешенное состояние будет происходить тогда, сила F динамического воздействия потока на частицу станет равной весу частицы за вычетом подъёмной силы A :

$$F = G - A \quad (4-2)$$

Для шаровых частиц:

$$F = \psi \frac{\pi d^2}{2} \cdot W_g \cdot \rho_c \quad (4-3)$$

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_c \cdot g \quad (4-4)$$

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_c \cdot g \quad (4-5)$$

где: d – диаметр частицы, м;

W_g – действительная скорость потока между частицами, м/сек;

ρ_c и ρ_q – плотность среды и частицы, кг/м³;

ψ – коэффициент сопротивления, зависящий от величины критерия Рейнольдса $\psi = f(Re)$, безразмерный;

g – ускорение свободного падения, м/сек².

Если среда – газ, то $\rho_c \ll \rho_q$ и

$$P \approx G \quad (4-6)$$

Когда весь слой перейдет во взвешенное состояние, потеря давления будет равна весу частиц, приходящихся на единицу площади поперечного сечения аппарата:

$$\Delta P_{сл} = \frac{G_{сл}}{S} \quad (4-7)$$

где: $G_{сл}$ – вес всех частиц слоя, м;

S – площадь поперечного сечения, м².

При увеличении расхода газа и его фиктивной скорости W , величина $\Delta P_{сл}$ будет сохранять постоянное значение равно $G_{сл} / S$, до тех пор, пока существует взвешенный слой, т.е. до скорости газа $W_{ун}$. Постоянство величины $\Delta P_{сл}$ для взвешенного слоя объясняется тем, что при повышении расхода газа происходит одновременно увеличение объема взвешенного слоя. Из-за расширения слоя действительная скорость газа W_d между частицами, определяется согласно уравнению (4-1); сила воздействия потока на частицу может оставаться неизменной. Важнейшей характеристикой слоя твердых частиц как неподвижного, так и взвешенного, является порозность ε – объемная доля газа (жидкости) в слое:

$$\varepsilon = \frac{V_{сл} - V_q}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_q}{V_{сл}}$$

где: $V_{сл}$ – общий объем, занимаемый слоем, м³;

V_q – объем, занимаемый только твердыми частицами, м³.

Для неподвижного слоя шаровых частиц одинакового диаметра порозность ε_0 составляет приблизительно 0,4 независимо от диаметра частиц. Для взвешенного слоя порозность ε_0 с увеличением скорости газа будет повышаться, так как объем взвешенного слоя $V_{сл}$ при этом возрастает. При скорости газа $W_{ун}$ (предельная для взвешенного слоя) можно считать, что: $V_{сл} \gg V_q$ и $\varepsilon_{ун} = 1$. Таким образом, взвешенный слой шаровых частиц может существовать в пределах значений ε от 0,4 (при $W_{кр}$) до 1 (при $W_{ун}$). С некоторым приближением эти пределы можно принять и для частиц, имеющих форму многогранника. Для данных частиц (диаметр d , плотность ρ) и для данной среды (плотность ρ_c , вязкость ν_c) порозность взвешенного слоя определяется скоростью среды (газа) W . Для вычисления величин W и ε по известным свойствам системы предложен ряд формул.

С целью обобщения опытных данных полученные для разных систем, эти данные представляют в виде зависимости между безразмерными переменными – критериями подобия, которые включают все размерные физические величины, входящие в выражения (4-1) – (4-5).

Наиболее удобны для расчета и наглядной является графическая зависимость (рис. 4-2).

$$Ly = f(Ar, \varepsilon_p) \quad (4-8)$$

где: $Ly = \frac{P_c^3}{Ar} = \frac{\omega^2 \cdot \rho_c^2}{\mu(\rho - \rho_c)g}$ – критерий Лященко;

$Ar = \frac{Re}{Fr} \cdot \frac{(\rho - \rho_c)}{\rho_c} = \frac{d^3 \rho_c (\rho - \rho_c) g}{\mu_c^2}$ – критерий Архимеда;

$Re = \omega \cdot d \frac{\rho_c}{\mu_c}$ – критерий Рейнольдса;

$Fr = \frac{\omega^2}{g \cdot d}$ – критерий Фруда.

Удобство зависимости (4-8) заключается в том, что критерий Лященко не содержит диаметра частицы, а критерий Архимеда – скорости газа. На рис. 4-2 представлена в логарифмических координатах зависимость критерия Ly от критерия Ar при разных значениях ε . Этот график дает возможность найти любую из трёх величин.

чин (d, ω, ε), если известны две остальные физические свойства системы (α, c_2, m_2).

Описание установки

Установка (рис. 2-2) состоит из стеклянной колонки (1) с внутренним диаметром 65 мм. В нижней части колонки имеется газораспределительная сетка (2). На сетке находится слой твердых частиц (кварцевый песок) (3). Воздух, подаваемый вентилятором (4), проходит через расходомер (диафрагму) и с помощью вентиля (5) может быть подан под сетку в колонку. К диафрагме подключен дифференциальный манометр (6). Падение давления воздуха в колонке измеряют другим дифференциальным манометром (7).

Методика проведения работы.

Приступая к работе, закрывают полностью вентиль (5). После этого пускают в ход вентилятор. Открывая выпускной вентиль устанавливают такой начальный расход воздуха, чтобы показания дифманометра при расходомере было приблизительно 10 мм.в.ст. В этот момент измеряют перепад давления по дифманометру, и высоту кипящего слоя твердых частиц.

Записав результаты измерений в отчетную таблицу, проводят в той же последовательности измерения при втором расходе воздуха, затем при третьем и т.д.

Обработка опытных данных.

По данным отчетной таблицы строят (для каждой высоты) график зависимости $\Delta P_{сл}$ от скорости воздуха W . По этому графику определяют критическую скорость воздуха $W_{кр}$. Затем вычисляют порозность слоя:

$$\varepsilon = \frac{V_{сл} - V_{ч}}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_{ч}}{V_{сл}}$$

После чего вычисляют критерий Лященко для критической скорости:

$$Ly_{кр} = \frac{W_n^3 b \cdot \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_v) g}$$

и по рис. 4-2 находят при известном Ly , соответствующее ей значение критерия Архимеда, по которому определяют диаметр частиц.

Далее по рис. 4-2 находят предельное значение Ly , $Ly = 1$ позволяющее найти скорость уноса $W_{ун}$ и расход воздуха, при котором начинается унос из колонки загруженных в нее твердых частиц. Наконец, определяют по формуле (4-4) вес слоя частиц в каждой секции.

Часовой расход протекающей среды определяется по формуле

$$G = 0.004 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot \kappa_2 \cdot d^2 \sqrt{\Delta P \cdot \gamma} \quad [\text{кг/ч}] \quad (4-9)$$

где: α – коэффициент расхода, учитывающий шероховатость и неостроту входной кромки диафрагмы;

ε – поправочный коэффициент на расширение измеряемой среды;

ε_2 – поправочный коэффициент на тепловое расширение диафрагмы и сечения трубопровода, $\varepsilon_2 = 1$ при изменении расхода, если температура измеряемой среды меньше 100 °С;

d – диаметр отверстия диафрагмы, мм;

ΔP – перепад статических давлений до и после диафрагмы, н/м²;

γ – удельный вес протекающей среды до дроссельного устройства (1,293 кг/м³);

d – диаметр трубопровода (50 мм).

Измерением определяется ΔP и $P_{изб}$,

Причем $P_{абс} = P_{бар} + P_{изб}$

Скорость течения воды :

$$W = \frac{G}{f}, \quad \text{м/сек}$$

где: $f = \frac{\pi d_k^2}{4}$; d_k – диаметр стеклянной колонки, $d_k = 65$ мм.

| Коэффициент расхода. | | Поправочный коэффициент на расширение измеряемой среды | |
|----------------------|---------|--|-------------------|
| d=25 мм | D=50 мм | | $\varepsilon=0,3$ |
| 0,6211 | 0,6162 | 0,01 | 0,997 |
| 0,6752 | 0,6221 | 0,05 | 0,984 |
| 0,6843 | 0,6293 | 0,1 | 0,968 |
| 0,6875 | 0,5327 | | |
| 0,6992 | 0,6492 | 0,15 | 0,952 |
| 0,7794 | 0,6607 | 0,2 | 0,963 |

отчетная таблица

| №№ п/п | показания дифмоно- метра | расход воздуха | скорость воздуха | гидравличе- ское сопро- тивление | высота псевдо- ожигенного слоя |
|-----------|--------------------------------|-------------------|---------------------|--|-----------------------------------|
| | | | | | |