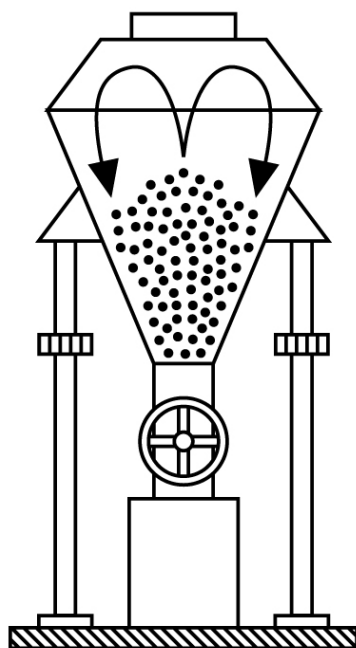


В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин, Е.Н. Громова

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКАХ

**Учебно-методическое пособие
для выполнения лабораторных работ**



**Санкт-Петербург
2017**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин, Е.Н. Громова

**ГИДРОДИНАМИКА
И ТЕПЛОМАССООБМЕН
В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКАХ**

**Учебно-методическое пособие
для выполнения лабораторных работ**

**Санкт-Петербург
2017**

УДК 621.1.(075)
ББК 31.31я7
Л 195

Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н., Громова Е.Н. Гидродинамика и тепломассообмен в газодисперсных потоках: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2017. -57 с.

В настоящем учебно-методическом пособии приведены основные теоретические положения о гидродинамике и тепломассообмене в газодисперсных потоках, описание лабораторной установки, а также методика проведения опытов и обработки полученных результатов. Приведены конструкции конвективных установок для сушки дисперсных материалов во взвешенном состоянии. Прилагаются вспомогательные таблицы справочных величин.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов энергетических и технологических вузов, обучающихся по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники и теплосиловых установок Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I В.И. Крылов;
канд. техн. наук, директор института энергетики и автоматизации ВШТЭ Т.Ю. Короткова.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебно-методического пособия.

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2017
© Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н.,
Громова Е.Н., 2017

ВВЕДЕНИЕ

Сушка мелкодисперсных материалов во взвешенном состоянии применяется практически во всех отраслях промышленности: химической, энергетической, в сельском хозяйстве и др.

В целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности перемещение мелкодисперсных материалов (щепа, опилки, химикаты) производится с помощью пневмотранспорта). Снижение влажности лигнина, щепы, целлюлозы производится в специально предназначенных пневматических сушильных установках.

Разновидностью пневматических установок являются аэрофонтанные установки, в которых высушиваемый материал находится в различных аэродинамических условиях: по центральной конусной части материал поднимается вверх, а вне зоны действия струи - опускается вниз.

Метод сушки влажных материалов во взвешенном состоянии является весьма эффективным в связи с большой удельной поверхностью, участвующей в тепломассообмене с сушильным агентом.

В качестве сушильного агента могут применяться нагретый воздух, отработавшие или специально полученные для целей сушки продукты сгорания топлива. К недостаткам таких установок следует отнести достаточно сложную схему разделения высушенного материала и сушильного агента, в которую могут входить циклоны, фильтры различных конструкций, скрубберы и др. устройства.

Свое развитие слоевой способ сушки влажных материалов получил в так называемом "кипящем слое", в котором материал или топливо находится в псевдоожиженном состоянии. Тепломассообмен при этом значительно возрастает.

Задача, которую ставили авторы при создании лабораторного стенда, заключалась в том, чтобы дать студентам физическое представление о пневматических сушильных, аэрофонтанных сушильных установках и установках с "кипящим слоем", научить рассчитывать аэродинамику потока и тепломассообмен, производить конструктивные и поверочные расчеты таких установок.

УСТАНОВКИ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ

Пневматические сушильные установки

Пневматические установки применяются как для транспортировки, так и для подсушки мелкодисперсных материалов. На рис. 1а приведена схема шахтно-мельничной установки для размола топлива, его подсушки в шахте мельницы и подачи топливно-воздушной смеси в топку котельного агрегата.

Во время пребывания частицы топлива в шахте происходит интенсивное испарение влаги с ее поверхности, в результате чего уменьшается влажность топлива и стабилизируется процесс горения топлива.

Применяются также самостоятельные пневматические установки, которые предназначены для подсушки лигнина (отходов целлюлозно-бумажного производства), опилок, торфа, корьевых отходов и других видов топлива и материалов (рис. 1б). В таких установках в качестве сушильного агента могут применяться отработавшие в котельном агрегате продукты сгорания или газо-воздушная смесь, подготовленная в специально для этого предназначенных топочных устройствах. Крупные частицы топлива падают вниз и сжигаются во вспомогательных топках, располагающихся в нижней части трубы. Мелкие частицы подхватываются потоком газов и выносятся из сушилки в циклон, где происходит разделение твердой фазы и газовой.

В качестве примера применения пневматических установок для транспортировки материалов на рис. 1в показана схема подачи щепы в варочный котел. Во всасывающую линию вентилятора подается щепа, которая затем по пневмопроводу подается в бункер щепы, расположенный над варочным котлом.

Аэрофонтанные сушильные установки

Аэрофонтанные установки применяются для сушки сыпучих материалов: песка, зерна, целлюлозы, корьевых отходов и др. Особенность их работы заключается в том, что восходящая струя воздуха (или газа) в центре конуса увлекает частицы материала, которые, достигнув определенной высоты, возвращаются вниз вдоль стенок конусной части, напоминая траекторию полета капли воды в фонтане.

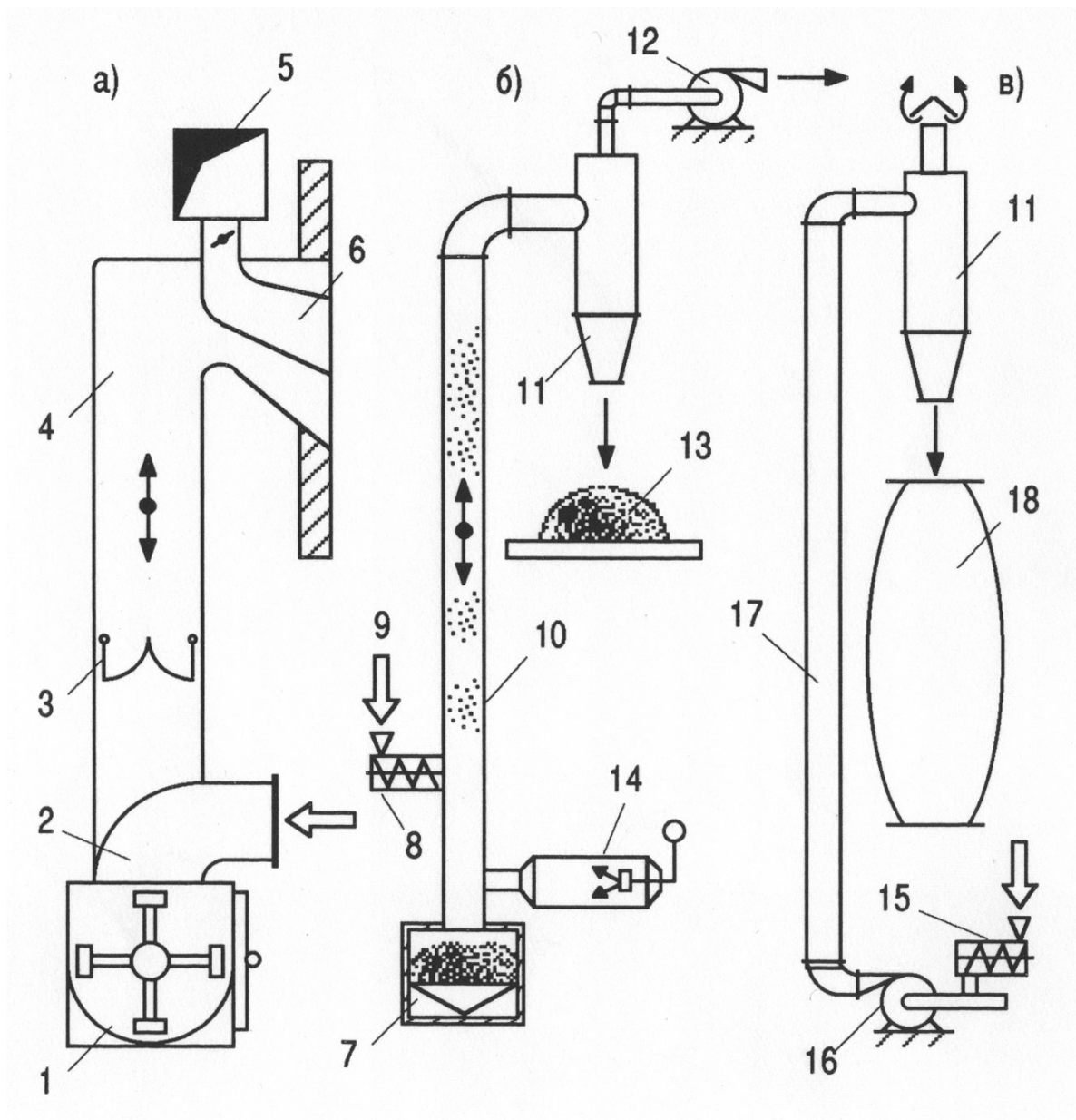


Рис. 1. Схемы пневматических установок:

а) шахтно-мельничная установка; б) пневматическая сушильная установка; в) пневмопровод для подачи щепы в варочный котел:

1 - шахтная мельница для размола топлива; 2 - нагретый первичный воздух; 3 - шибер; 4 - шахта мельницы; 5 - воздуховод вторичного дутья; 6 - сопла вторичного дутья; 7 - вспомогательная (дожигательная) топка; 8 - питатель; 9 - сырой материал; 10 - пневматическая труба-сушилка; 11 - циклон; 12 - дымосос; 13 - высушенный материал; 14 - топка для получения сушильного агента; 15 - питатель щепы; 16 - вентилятор; 17 - пневмопровод; 18 - варочный котел

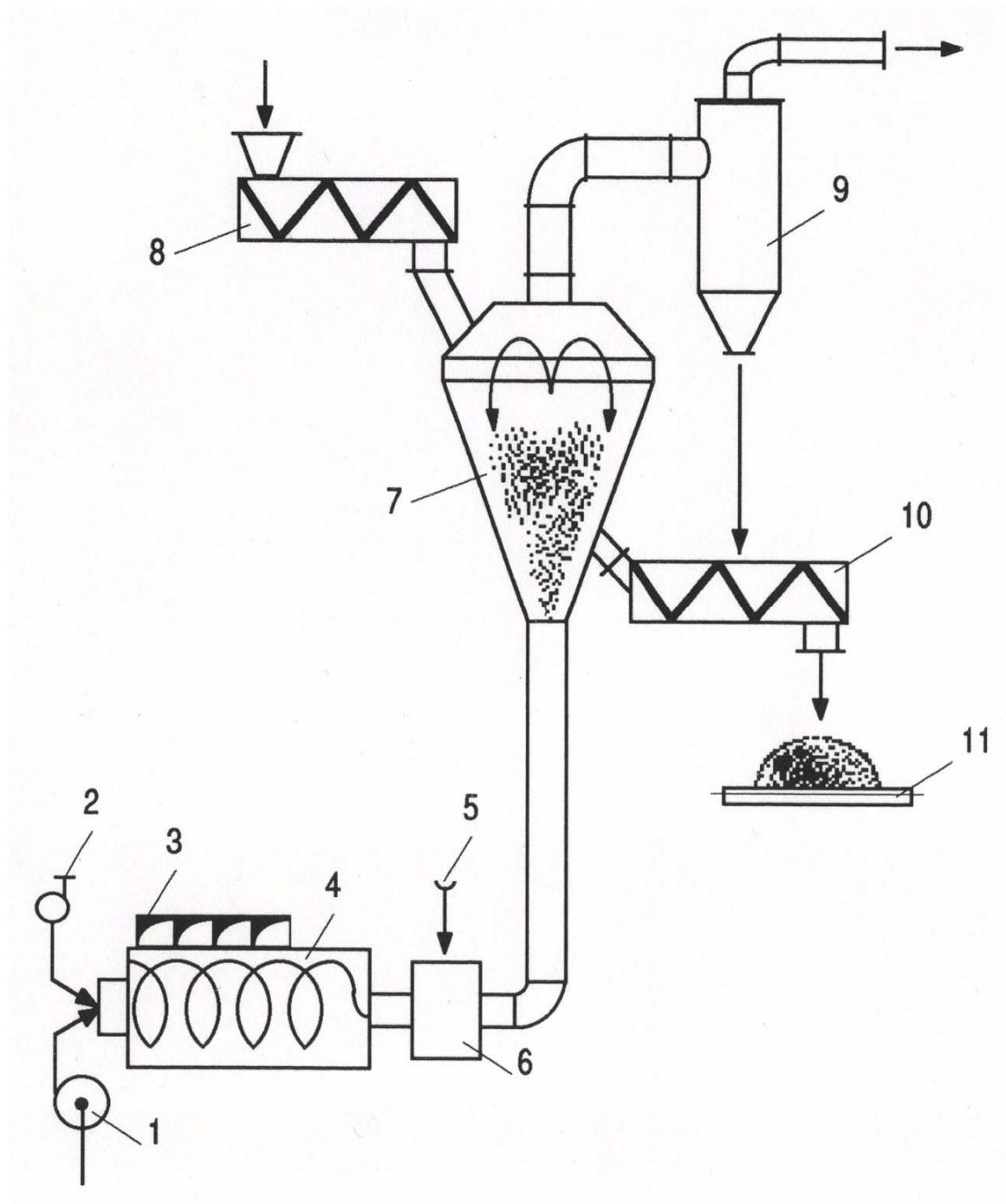


Рис. 2. Схема аэрофонтанной сушильной установки:

1 - подача в топку дутьевого воздуха; 2 - подача топлива;
 3 - вторичный воздух; 4 - топка для получения сушильного агента;
 5 - присадочный воздух; 6 - камера смешения; 7 - аэрофонтанная сушилка; 8 - питатель влажного материала; 9 - циклон; 10 - питатель сухого материала; 11 - транспортер

На рис. 2 показана схема одноступенчатой аэрофонтанной установки, состоящей из топки для получения высокотемпературных дымовых газов, камеры смешения, аэрофонтанной сушилки и циклона. Имеются также схемы, в которых в качестве сушильного агента применяется нагретый воздух или отработавшие в котельном агрегате дымовые газы.

Преимущество таких установок по сравнению с пневматическими трубами-сушилками заключается в том, что высушиваемый материал, многократно циркулируя в установке, может находиться там до тех пор, пока не приобретет необходимую влажность (т.е. конечную влажность материала можно регулировать), после чего питателем сухого материала подается потребителю.

Установка кипящего слоя

На рис. 3 приведена схема установки для сушки влажных материалов, оборудованной камерой с кипящим слоем. Основным узлом в камерах кипящего слоя является система воздухораспределения (решетка), состоящая из колпачков различной конфигурации, основным назначением которых является равномерное распределение потока подаваемого под решетку воздуха (или газа) со скоростью, обеспечивающей псевдоожижение слоя. С повышением скорости газа увеличивается давление на частицы, и при достижении критической скорости частицы поднимаются и хаотически циркулируют в слое, интенсивно перемешиваясь. В результате этого увеличивается поверхность контакта фаз, а показатели температуры и концентрации во всем объеме выравниваются. Интенсивность процесса теплообмена при этом резко возрастает.

Таким образом, использование кипящего слоя для сушки материалов позволяет добиться равномерности сушки при высокой интенсивности процесса.

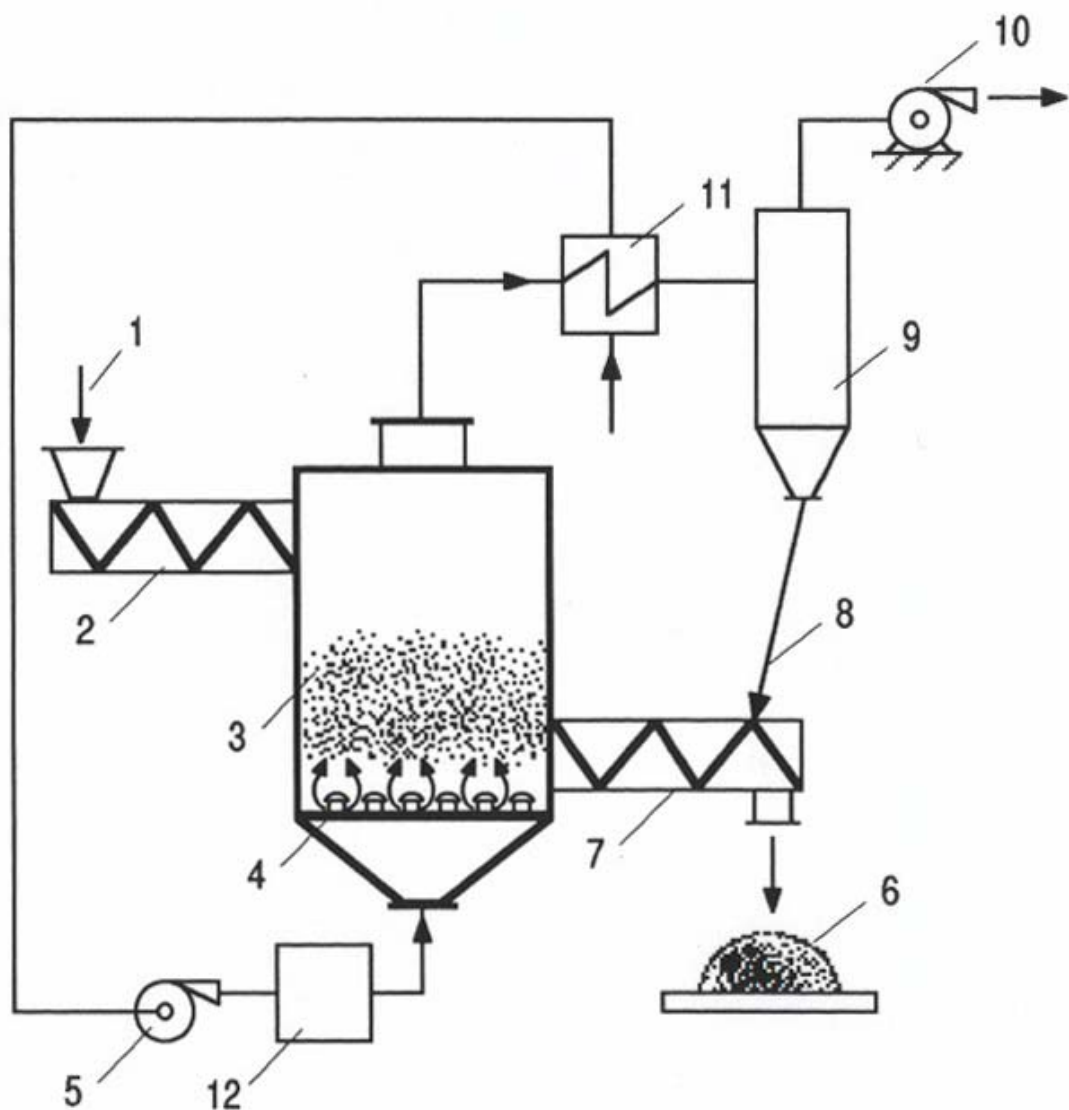


Рис. 3. Схема сушильной установки с кипящем слоем:

- 1 - подача влажного материала; 2 - питатель сырого топлива;
- 3 - кипящий слой; 4 - воздухораспределительные колпачки;
- 5 - воздуходувка; 6 - высушенный материал; 7 - питатель сухого материала;
- 8 - возврат уловленного уноса; 9 - циклон; 10 - дымосос;
- 11 - теплоуловитель; 12 - воздухонагреватель (калорифер)

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА для исследования гидродинамики и тепломассообмена при сушке дисперсных материалов

Лабораторный стенд предназначен для исследования гидродинамики и тепломассообмена между потоком воздуха и дисперсным материалом в пневматической трубе, аэрофонтанной сушилке и кипящем слое.

Исследование гидродинамики заключается в определении скорости витания частиц материала, имеющих различные размеры и форму, определении гидравлического сопротивления циклона и кипящего слоя материала.

Исследование тепломассообмена заключается в определении удельных расходов теплоты и влаги, а также расчете коэффициентов конвективного тепло- и массообмена в процессе сушки дисперсных материалов во взвешенном состоянии.

Лабораторный стенд (рис. 4) включает в себя четыре лабораторные установки и состоит из центробежного вентилятора (1), воздухопроводов (2), электрического калорифера (3), шиберных задвижек (4), двух вертикальных стеклянных труб (пневматическая труба (5) и труба для определения сопротивления кипящего слоя (6)), конической насадки (аэрофонтанная сушилка (7)), цилиндроконического сосуда с воздухораспределительными колпачками (установка кипящего слоя (8)), циклона (9) для улавливания частиц материала. Основные конструктивные характеристики стенда представлены в табл.1.

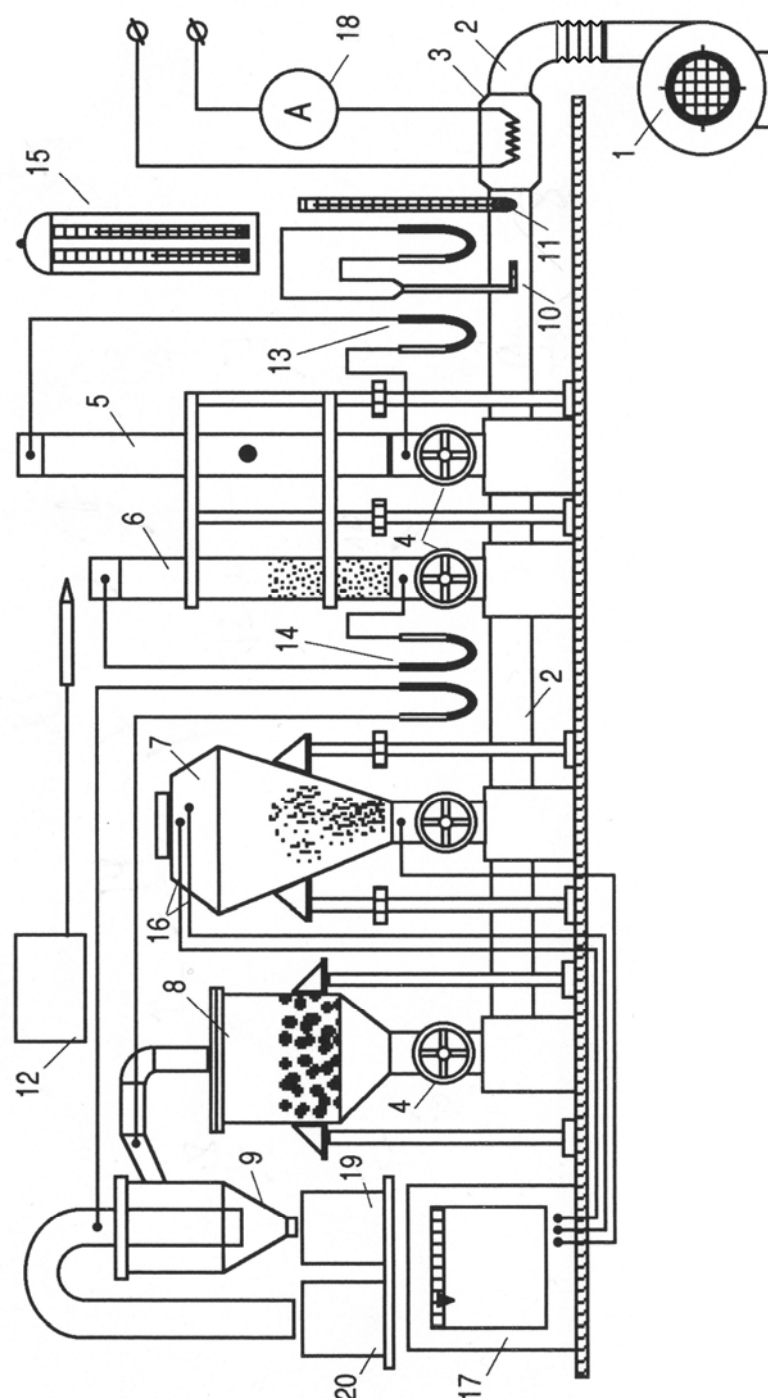


Рис. 4. Схема лабораторного стенда:

1 - центробежный вентилятор; 2 - воздуховоды; 3 - электрический калорифер; 4 - шиберные задвижки; 5 - пневматическая труба; 6 - труба для определения сопротивления кипящего слоя; 7 - аэрофонтанная сушилка; 8 - установка кипящего слоя; 9 - циклон; 10 - трубка Прандтля; 11 - термометр; 12 - термоанемометр; 13, 14 - U-образные дифманометры; 15 - психрометр; 16 - термодары; 17 - потенциометр; 18 - амперметр; 19, 20 - бункеры-сборники твердых частиц

Таблица 1

**Основные конструктивные характеристики
лабораторного стенда**

Наименование	Размер, мм
Размеры воздуховода в месте установки трубы Прандтля	50x50
<i>Лабораторная работа №1</i>	
Внутренний диаметр вертикальной стеклянной трубы №1	39,5
Высота стеклянной трубы №1	1370
<i>Лабораторная работа №2</i>	
Внутренний диаметр вертикальной стеклянной трубы №2	40
Высота стеклянной трубы №2	800
<i>Лабораторная работа №3</i>	
Внутренний диаметр входного отверстия	40
Внутренний диаметр широкой части конуса	275
Высота конусной части установки	350
Внутренний диаметр выходного отверстия установки	78
<i>Лабораторная работа №4</i>	
Внутренний диаметр цилиндрической части установки	194
Внутренний диаметр выходного патрубка	83
Высота цилиндрической части установки	270
Внутренний диаметр корпуса циклона	184
Размеры входного патрубка циклона	43x82
Внутренний диаметр выходного патрубка циклона	90
Внутренний диаметр выходного патрубка для выгрузки материала из циклона	26

Лабораторный стенд снабжен контрольно-измерительными приборами. На горизонтальном участке воздуховода установлены термометр (11) для регистрации температуры и трубка Прандтля (10) с U-образным дифманометром для определения расхода воздуха в установке.

Для измерения скорости воздуха в выходных сечениях установки в диапазоне 0,1 – 5 м/с используется переносной термоанемометр (12). Принцип действия термоанемометра (рис. 5) основан на зависимости теплоотдачи нагретого тела, помещенного в поток, от скорости движения потока.



Рис. 5. Термоанемометр
(общий вид)

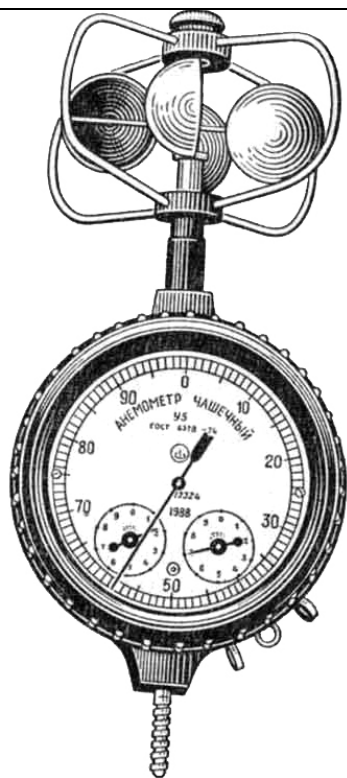


Рис.6. Ручной чашечный
анемометр со счетным
механизмом

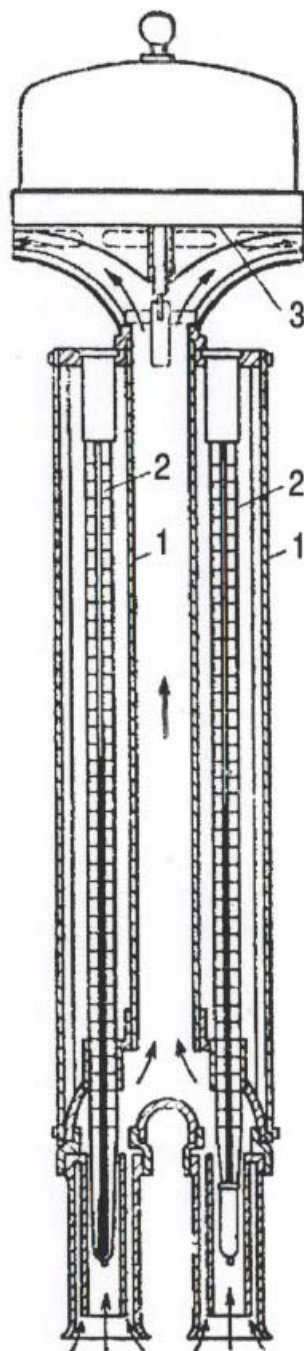


Рис.7. Психрометр с искусственной
циркуляцией воздуха:
1 - корпус; 2 - термометры;
3 - пружинный вентилятор

Чувствительный элемент, несущий платиновую нить, нагреваемую электрическим током, устанавливается в воздушном потоке, которым она охлаждается. При понижении температуры сопротивление нити уменьшается, что выводит измерительный мост из состояния равновесия, контролируемого милливольтметром. Для измерения скорости воздуха свыше 5 м/с используется ручной чашечный анемометр (рис. 6). Принцип его действия основан на том, что скорость потока воздуха измеряется по числу оборотов вертушки.

Скорость воздуха в пневматической трубе определяется в зависимости от гидравлического сопротивления потоку воздуха по графику $w = f(P)$ с помощью специально оттарированного U-образного дифманометра (13).

Гидравлическое сопротивление циклона и слоя зернистого материала измеряется с помощью дифманометров (14).

Температура и влагосодержание воздуха в помещении измеряются с помощью двух психрометров (15) (с неорганизованной и с искусственной циркуляцией воздуха). Устройство психрометра с искусственной циркуляцией воздуха (рис. 7) следующее. По двум трубкам, в которых помещены термометры, воздух со скоростью 3-5 м/с просасывается вентилятором, действующим от заводской пружины. На ртутный резервуар морского термометра надет батистовый колпачок, который смачивается водой при помощи пипетки.

Температура воздуха по сухому и смоченному термометрам в установке измеряется термопарами (16) и регистрируется самопишущим потенциометром (17).

Лабораторная работа № 1

Определение скорости витания и коэффициента формы частиц

При расчете пневматических сушилок скорость газового потока определяется в зависимости от скорости витания частиц высушиваемого материала. Рассмотрим, что же такое скорость витания.



Рис. 8. Силы, действующие на твердую частицу в направленном вверх потоке воздуха

На одиночную твердую частицу, находящуюся в направленном вверх потоке газа или жидкости (рис.8), действуют: сила тяжести G , подъемная (Архимедова) сила A и сила динамического давления потока P .

Для шаровой частицы диаметром d м

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_m \cdot g, \quad (1)$$

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_{cp} \cdot g, \quad (2)$$

$$P = \xi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{w^2 \rho_{cp}}{2}, \quad (3)$$

где ρ_m и ρ_{cp} - плотности частицы и среды, кг/м³; w - скорость потока (среды), м/с; ξ - безразмерный коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий от режима течения среды; g - ускорение свободного падения, м/с².

Если $G - A > P$, частица будет опускаться вниз, если $G - A < P$, частица будет уноситься потоком вверх. При $G - A = P$, когда все силы, действующие на частицу, уравновешены, частица будет находиться в потоке во взвешенном состоянии, будет в нем "витать". Скорость среды, при которой достигается такое взвешенное состояние частицы, называют скоростью витания.

Скорость витания $w_{вит}$ шаровой частицы можно определить исходя из уравнения равновесия сопротивления среды и силы тяжести:

$$\frac{\pi d^3}{6} \cdot (\rho_m - \rho_{cp}) \cdot g = \xi \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{w_{вит}^2 \rho_{cp}}{2}, \quad (4)$$

$$w_{вит} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_{cp}) \cdot d}{3 \cdot \xi \cdot \rho_{cp}}}. \quad (5)$$

Вычисление скорости витания по уравнению (5) затруднено тем, что величина ξ также зависит от $w_{вит}$ через критерий Re: $w = f(Re)$.

Для расчета скорости витания одиночной шаровой частицы $w_{вит}$ в зависимости от ее диаметра и свойств среды предложено критериальное уравнение:

$$Re_{вит} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}, \quad (6)$$

где $Re_{вит} = \frac{w_{вит.шара} \cdot d}{\nu_{cp}}$ - критерий Рейнольдса; ν_{cp} - коэффициент кинематической вязкости среды, м²/с.

Критерий Архимеда рассчитывается по формуле:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_m - \rho_{cp}) \cdot g}{\nu_{cp}^2 \cdot \rho_{cp}}. \quad (7)$$

В пневматических сушильных установках приходится перемещать не шарообразные частицы, а частицы неправильной формы. Коэффициент лобового сопротивления ξ таких частиц

отличается от соответствующих значений для частиц шарообразной формы. При гидродинамических, тепло- и массообменных расчетах размер частиц неправильной формы условно заменяют диаметром сферы, эквивалентной частице по объему. Тогда эквивалентный диаметр частицы можно выразить через ее объем:

$$d_{\text{эк}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}}. \quad (8)$$

Неправильность формы частицы учитывают через так называемый коэффициент (фактор) формы, характеризующий отклонение реальной формы тела от сферической. Коэффициент формы, выраженный как отношение площади поверхности сферы $F_{\text{сф}}$, эквивалентной по объему частице, к площади поверхности частицы $F_{\text{м}}$, называется коэффициентом сферичности:

$$\varphi_s = \frac{F_{\text{сф}}}{F_{\text{м}}}. \quad (9)$$

Коэффициент сферичности φ_s всегда меньше или равен единице: $\varphi_s \leq 1$, причем для шара $\varphi_s = 1$. Для частиц неправильной формы коэффициент формы находят экспериментальным путем.

Скорость витания шаровой частицы $w_{\text{вит.шар}}$ всегда больше скорости витания частицы нешаровой формы такого же объема, поскольку шаровая частица имеет наименьшую площадь поверхности и на нее в меньшей степени будет действовать сила динамического давления потока P . Отношение скорости витания частицы нешаровой формы к скорости витания шара равняется коэффициенту формы (сферичности):

$$\varphi_s = \frac{w_{\text{вит}}}{w_{\text{вит.шара}}} \leq 1. \quad (10)$$

Цель работы - экспериментальное определение скорости витания в потоке воздуха шаровой частицы и частиц неправильной формы. Сопоставление найденных опытным путем значений скорости витания с рассчитанными по формуле.

Описание лабораторной установки

Установка (рис. 4) состоит из центробежного вентилятора (1), шиберной задвижки (4) и стеклянной трубы (5). В трубе помещается твердая частица шаровой или неправильной формы. Воздух нагнетается вентилятором через стеклянную трубу и выбрасывается в помещение. Расход воздуха регулируется с помощью шиберной задвижки. Для измерения скорости воздуха в трубе установлен специально оттарированный U-образный дифманометр (13). Скорость воздуха в выходном сечении трубы также измеряется с помощью термоанемометра (12). Температура воздуха измеряется термометром (11).

Методика проведения работы

С помощью регулировочных винтов приподнимают стеклянную трубу и помещают в нее исследуемую шаровую частицу, предварительно определив ее диаметр и массу.

Поворотом рубильника на щите подключают установку к электросети. Нажатием кнопки включают вентилятор.

Главным движением постепенно открывают (или закрывают) задвижку регулирующего устройства, изменяя расход воздуха до тех пор, пока частица не станет витать около отметки на стеклянной трубе.

Регистрируют показания дифманометра (или термоанемометра) и заносят в журнал наблюдений. Прикрывают заслонку. Опыт повторяют три раза. Закрывают заслонку регулирующего устройства и останавливают вентилятор. Вынимают из трубы шаровую частицу и помещают частицу нешаровой формы, предварительно определив ее размеры и массу. Проводят описанные выше опыты с новой частицей.

Обработка опытных данных

По среднему значению Δp определить скорость воздуха по градуировочному графику дифманометра (рис. 9).

При использовании термоанемометра скорость движения воздуха измеряют в выходном сечении трубы.

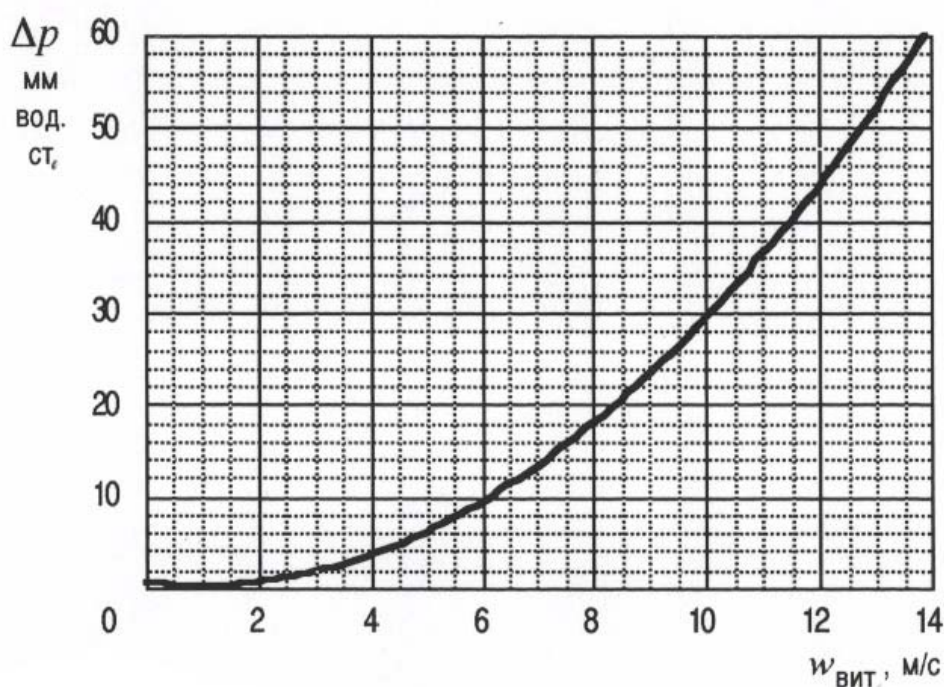


Рис. 9. График для определения скорости движения воздуха в трубе

Если диаметр шаровой частицы $d_{\text{ш}}$ соизмерим с внутренним диаметром трубы, определяют скорость витания в зазоре между стенкой трубы и поверхностью частицы.

$$w_{\text{вит}} = \frac{w_{\text{вит.эксп}} \cdot D_{\text{вн.тр}}^2}{D_{\text{вн.тр}}^2 - d_{\text{ш}}^2}, \quad (11)$$

где $D_{\text{вн.тр}}$ - внутренний диаметр трубы (см. таблицу 1), $w_{\text{вит.эксп}}$ - скорость воздуха в выходном сечении трубы.

Для частицы не шаровой формы определить объем частицы и ее эквивалентный диаметр по формуле (8).

Рассчитать критерий Архимеда по формуле (7). Плотность воздуха $\rho_{\text{ср}}$ (кг/м^3) берут для данной температуры по справочным данным (прил. 1).

Рассчитать критерий Рейнольдса по уравнению (6).

Определить расчетную скорость витания исследуемой частицы.

Определить коэффициент формы частицы по формуле (10).

Пример обработки опытных данных

1. Средняя скорость витания (по замерам) пластмассового шарика ($\rho_m = 1000 \text{ кг/м}^3$; $d_{ш} = 9,3 \text{ мм}$)

$$w_{\text{вит.эксп}} = \frac{14,6 + 14,5 + 13,8}{3} = 14,3 \text{ м/с}.$$

2. Критерий Архимеда для шаровой частицы

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_m - \rho_{cp}) \cdot g}{v_{cp}^2 \cdot \rho_{cp}} = \frac{(9,3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (1000 - 1,18) \cdot 9,81}{(15,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,18} = 2,78 \cdot 10^7.$$

3. Критерий Рейнольдса при скорости витания

$$Re_{\text{вит}} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} = \frac{2,78 \cdot 10^7}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{2,78 \cdot 10^7}} = 8595,6.$$

4. Расчетная скорость витания для пластмассового шарика

$$w_{\text{вит.расч}} = \frac{Re_{\text{вит}} \cdot v_{cp}}{d_{ш}} = \frac{8595,6 \cdot 15,5 \cdot 10^{-6}}{9,3 \cdot 10^{-3}} = 14,3 \text{ м/с}.$$

5. Коэффициент формы φ_s для шаровой частицы

$$\varphi_s = \frac{w_{\text{вит.эксп}}}{w_{\text{вит.расч}}} = \frac{14,3}{14,3} = 1.$$

6. Объем цилиндрической частицы плотностью $\rho_m = 65,3 \text{ кг/м}^3$, диаметром $d_{ц} = 19 \text{ мм}$, высотой $h_{ц} = 9 \text{ мм}$

$$V_{ц} = \pi \cdot R_{ц}^2 \cdot h_{ц} = 3,14 \cdot 9,5^2 \cdot 9 = 2550,5 \text{ мм}^3.$$

7. Эквивалентный диаметр цилиндра

$$d_{\text{эк}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{ц}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 2550,5}{3,14}} = 16,95 \text{ мм}.$$

8. Площадь поверхности цилиндрической частицы

$$F_{ц} = 2 \cdot \pi \cdot R_{ц} (R_{ц} + h_{ц}) = 2 \cdot 3,14 \cdot 9,5 \cdot (9,5 + 9) = 1104,3 \text{ мм}^2.$$

9. Площадь поверхности шаровой частицы того же объема

$$F_{ш} = \frac{\pi \cdot d_{эк}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 16,95^2}{4} = 902,6 \text{ мм}^2.$$

10. Расчетный коэффициент формы для цилиндра

$$\varphi_{s.расч} = \frac{F_{ш}}{F_{ц}} = \frac{902,6}{1104,3} = 0,817 \approx 0,82.$$

11. Критерий Архимеда для цилиндрической частицы

$$Ar = \frac{(16,95 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (65,3 - 1,18) \cdot 9,81}{(15,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,18} = 1,08 \cdot 10^7.$$

12. Критерий Рейнольдса для цилиндрической частицы

$$Re_{вит} = \frac{1,08 \cdot 10^7}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{1,08 \cdot 10^7}} = 5338.$$

13. Расчетная скорость витания для цилиндрической частицы

$$w_{вит.расч} = \frac{5338 \cdot 15,5 \cdot 10^{-6}}{16,95 \cdot 10^{-3}} = 4,88 \text{ м/с}.$$

14. Опытное значение коэффициента формы для цилиндрической частицы

$$\varphi_s = \frac{w_{вит.эксп}}{w_{вит.расч}} = \frac{4}{4,88} = 0,82.$$

Контрольные вопросы к работе № 1

1. Какие силы действуют на твердую частицу в потоке газа или жидкости?

2. Что такое скорость витания?

3. От чего зависит скорость витания?

4. Что такое дифманометр и для чего он служит?

5. Что такое термоанемометр и каков принцип его действия?

6. Как определяют экспериментально скорость витания частицы?

7. Что такое коэффициент формы частицы?

8. Чему равна скорость воздуха у поверхности частицы, если частица неподвижна относительно стенок трубы, движется вместе с потоком, падает вниз?

Лабораторная работа № 2

Изучение гидродинамики взвешенного слоя

Если через неподвижный слой твердых частиц, лежащих на решетке (рис. 10а), пропускать снизу вверх поток газа и при этом постепенно увеличивать его скорость, то при некоторой скорости движения газа, называемой критической, весь слой твердых частиц переходит во взвешенное состояние (рис. 10б). При дальнейшем повышении скорости газа в аппарате объем взвешенного слоя возрастает. Такой расширившийся взвешенный слой, в котором происходит интенсивное перемешивание твердых частиц, во многом напоминает кипящую жидкость - он "течет", через него "пробулькивают" пузыри газа (рис. 10в); поэтому его часто и называют кипящим или псевдооживленным слоем. При дальнейшем увеличении скорости газа пузыри могут увеличиваться в объеме, и таким образом, заполняется все сечение камеры. Начинается так называемое поршневое кипение слоя, заключающееся в том, что слой разделяется крупными пузырями и происходит расслоение материала (рис. 10г). Наконец, при некоторой скорости газа, называемой скоростью уноса (скоростью витания), взвешенный слой разрушается - твердые частицы уносятся из аппарата потоком газа (возникает их пневмотранспорт).

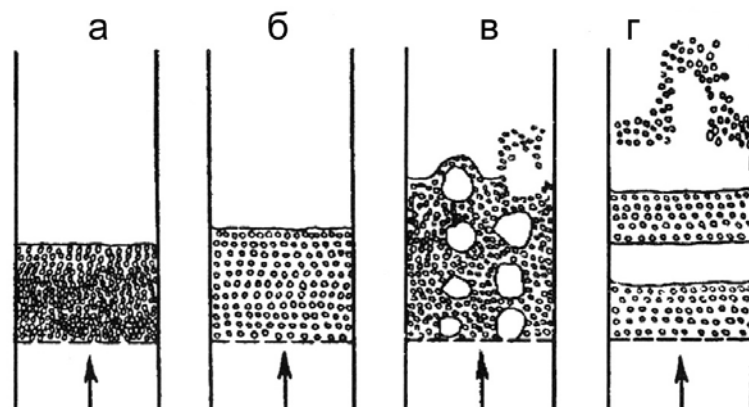


Рис. 10. Характер изменения структуры слоя в процессе псевдооживления:

- а - неподвижный слой; б - кипящий слой в начальной фазе;
- в - пузырьчатое кипение слоя; г - поршневое кипение слоя

Обозначим площадь поперечного сечения аппарата через f (м^2), а объемный расход газа через L ($\text{м}^3/\text{с}$). Тогда скорость газа, отнесенная к полному поперечному сечению пустого аппарата, или так называемая фиктивная скорость w_ϕ ($\text{м}/\text{с}$), будет равна

$$w_\phi = \frac{L}{f} . \quad (12)$$

Действительно, скорость газа w в промежутках между частицами слоя, измерить которую трудно, всегда больше фиктивной.

Если, увеличивая постепенно расход газа, измерять дифференциальным манометром падение давления газа при прохождении его через находящийся на решетке слой твердых частиц (рис. 11), т.е. измерить гидравлическое сопротивление слоя $\Delta p_{\text{сл}}$, а затем построить график зависимости $\Delta p_{\text{сл}}$ от фиктивной скорости газа w_ϕ , то этот график будет иметь вид, показанный на рис. 12.

Как видно из рис. 12, в области существования взвешенного слоя, начиная от критической скорости газа $w_{\text{кр}}$ до скорости уноса $w_{\text{ун}}$, величина $\Delta p_{\text{сл}}$ сохраняет постоянное значение. Причина этого рассмотрена ниже.

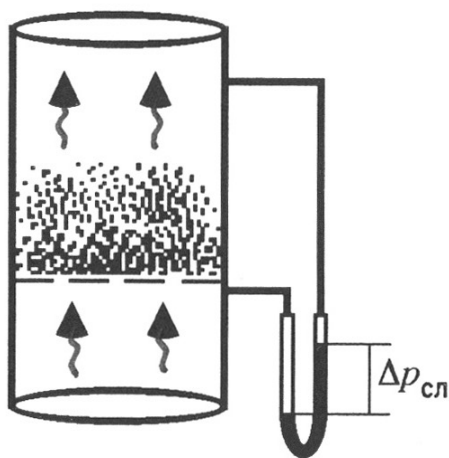


Рис. 11. Измерение гидравлического

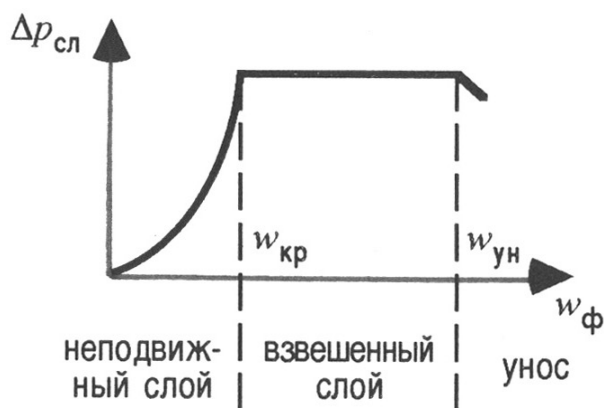


Рис. 12. Зависимость гидравли-

сопротивления слоя

ческого сопротивления слоя от
фиктивной скорости газа

Состояние псевдооживления возникает при такой скорости газового потока, когда сила гидравлического сопротивления слоя $\Delta p_{сл}$ (Па) равна весу слоя

$$\Delta p_{сл} = \frac{G_{сл} \cdot g}{f}, \quad (13)$$

где $G_{сл}$ - масса частиц слоя, кг; g - ускорение свободного падения, м/с².

Из уравнения (13) видно, что для взвешенного слоя потери давления $\Delta p_{сл}$ постоянны, т.е. не зависят от скорости газа w_{ϕ} . Это постоянство значения $\Delta p_{сл}$ объясняется тем, что при повышении расхода газа и его фиктивной скорости w_{ϕ} происходит одновременное увеличение объема взвешенного слоя и расстояния между частицами. Вследствие этого действительная скорость движения газа между частицами w , от которой зависит сопротивление слоя, остается неизменной.

При расчете процессов сушки в кипящем слое необходимо знать такие количественные характеристики дисперсных материалов, как плотность и структура.

Насыпная плотность материала - это плотность свободно насыпанного слоя дисперсного материала

$$\rho_{нс} = \frac{G_m}{V_0}. \quad (14)$$

Насыпная плотность определяется взвешиванием материала, насыпанного в сосуд известного объема V_0 , и зависит от плотности частиц материала ρ_m и порозности слоя.

Важнейшей характеристикой слоя твердых частиц, как неподвижного, так и взвешенного, является порозность слоя ε - это отношение пустот между частицами в слое к объему слоя

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0 - V_m}{V_0} = 1 - \frac{\rho_{нс}}{\rho_m}, \quad (15)$$

Для неподвижного слоя шаровых частиц одинакового диаметра порозность ε_0 составляет приблизительно 0,4 независимо от диаметра частиц. Для взвешенного слоя порозность ε с увеличением расхода газа будет повышаться, так как объем взвешенного слоя при этом возрастает. Среднюю порозность кипящего слоя можно приближенно определить по уравнению О. М. Тодеса и З. Б. Розенбаума

$$\varepsilon = \left(\frac{18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2}{Ar} \right)^{0,21}. \quad (16)$$

При скорости уноса $w_{ун}$, предельной для взвешенного слоя, можно считать, что $V_0 \gg V_m$ и $\varepsilon = 1$. Таким образом, взвешенный слой шаровых частиц одинакового диаметра может существовать в пределах от $\varepsilon = 0,4$ (при $w_\phi = w_{кр}$) до $\varepsilon = 1$ ($w_\phi = w_{ун}$). С некоторым приближением эти пределы можно принять и для частиц, имеющих форму многогранника. Рабочую скорость в аппаратах с кипящим слоем выбирают в пределах от $w_{кр}$ до $w_{ун}$.

Кипящий слой можно характеризовать также числом псевдооживления K , под которым понимается отношение рабочей скорости газа, отнесенной к полному сечению камеры w_ϕ , к скорости $w_{кр}$, при которой плотный слой переходит в состояние кипения.

$$K = \frac{w_\phi}{w_{кр}}, \quad (17)$$

Для расчета аппаратов с кипящим слоем необходимы расчетные уравнения, устанавливающие зависимость между физическими свойствами газа и твердых частиц, скоростью газа w_ϕ и порозностью слоя ε . Такие эмпирические уравнения представляют в виде зависимостей между обобщенными безразмерными переменными, так называемыми критериями подобия, которые включают все физические величины, оказывающие влияние на рассматриваемый процесс.

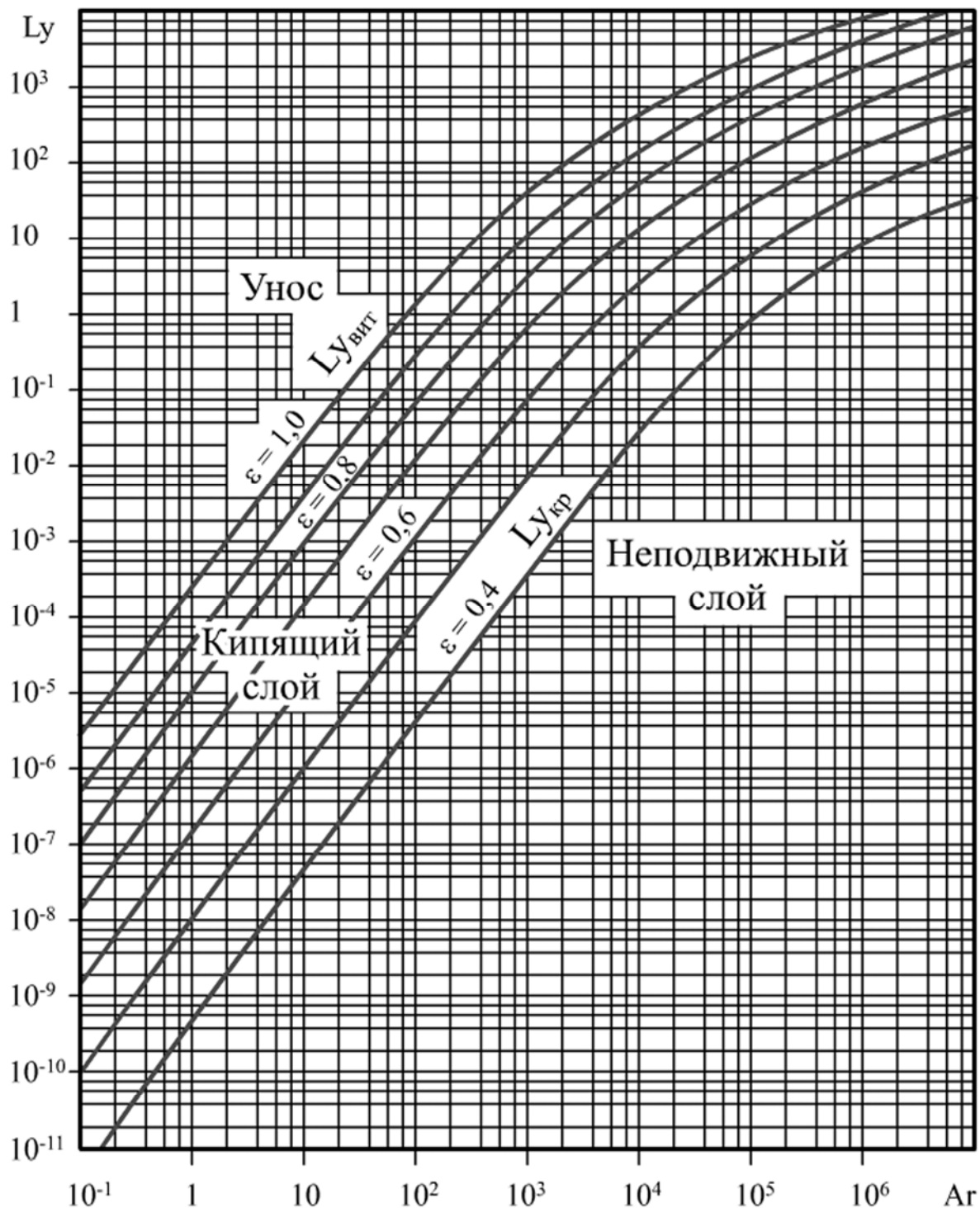


Рис. 13. Зависимость критерия Лященко от критерия Архимеда для шаровых частиц

В гидравлике взвешенного слоя очень удобной для расчетов и наглядной является графическая зависимость между критериями Лященко и Архимеда $Ly = f(Ar)$ при значениях ε от 0,4 до 1,

соответствующих области существования взвешенного слоя шаровых частиц (рис. 13).

Критерий Лященко определяется по формуле:

$$Ly = \frac{w_{\phi}^3 \cdot \rho_{cp}}{\nu_{cp} \cdot (\rho_m - \rho_{cp}) \cdot g}, \quad (18)$$

где ν_{cp} - вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$. Остальные обозначения прежние.

Если среда - газ, и $\rho_m \gg \rho_{cp}$ и выражение для критериев Лященко и Архимеда упрощаются:

$$Ly = \frac{w_{\phi}^3 \cdot \rho_{cp}}{\nu_{cp} \cdot \rho_m \cdot g}, \quad (19)$$

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_m \cdot g}{\nu_{cp}^2 \cdot \rho_{cp}}, \quad (20)$$

Цель работы - определение экспериментальной зависимости гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа. Определение критической скорости газа, среднего диаметра частиц и скорости уноса.

Описание лабораторной установки

Установка (рис. 4) состоит из центробежного вентилятора (1), шиберной задвижки (4) и стеклянной трубы (6). В трубе установлена металлическая сетка. На сетке находится слой твердых частиц. Воздух нагнетается вентилятором под сетку и, проходя слой материала, выбрасывается в атмосферу. Расход воздуха регулируется с помощью шиберной задвижки. Скорость воздуха в выходном сечении трубы измеряется с помощью термоанемометра (12). Гидравлическое сопротивление слоя измеряется дифференциальным манометром (14).

Методика проведения работы

Насыпают зернистый материал в цилиндрический сосуд и взвешивают его. После взвешивания пересыпают материал в стеклянную трубу и закрывают трубу сверху сеткой. Снимают предохранительный колпачок с термоанемометра и устанавливают

его датчик напротив выходного отверстия трубы. Включают термоанемометр в режиме автоматической компенсации температуры.

Поворотом рубильника на щите подключают установку к электросети. Нажатием кнопки включают вентилятор.

Плавными движениями постепенно открывают задвижку регулирующего устройства, изменяя расход воздуха. Регистрируют показания дифманометра и термоанемометра, а также высоту слоя материала и заносят в журнал наблюдений. Записав результаты измерений в журнал наблюдений (табл. 2), проводят измерения при втором значении расхода воздуха, затем при третьем и так до максимального, который дает вентилятор.

По окончании работы задвижку полностью закрывают и останавливают вентилятор.

Таблица 2

Журнал наблюдений

№ п/п	Фиктивная скорость воздуха w_{ϕ} , м/с	Сопротивление кипящего слоя Δp_{cl} , мм вод. ст	Высота кипящего слоя H , м
1			
2			
3			
4			
...			

Обработка опытных данных

1. Определить насыпную плотность исследуемого материала по формуле (14).
2. Определить порозность насыпного слоя по формуле (15).
3. По данным журнала наблюдений построить график зависимости Δp_{cl} от скорости воздуха w_{ϕ} (рис.14) и определить критическую скорость воздуха для данных частиц $w_{кр}$.

4. Вычислить критерий Лященко для критической скорости по формуле (19) и по графику $Ly = f(Ar)$ (рис. 13) найти при $\varepsilon = 0,4$ соответствующее значение критерия Архимеда.

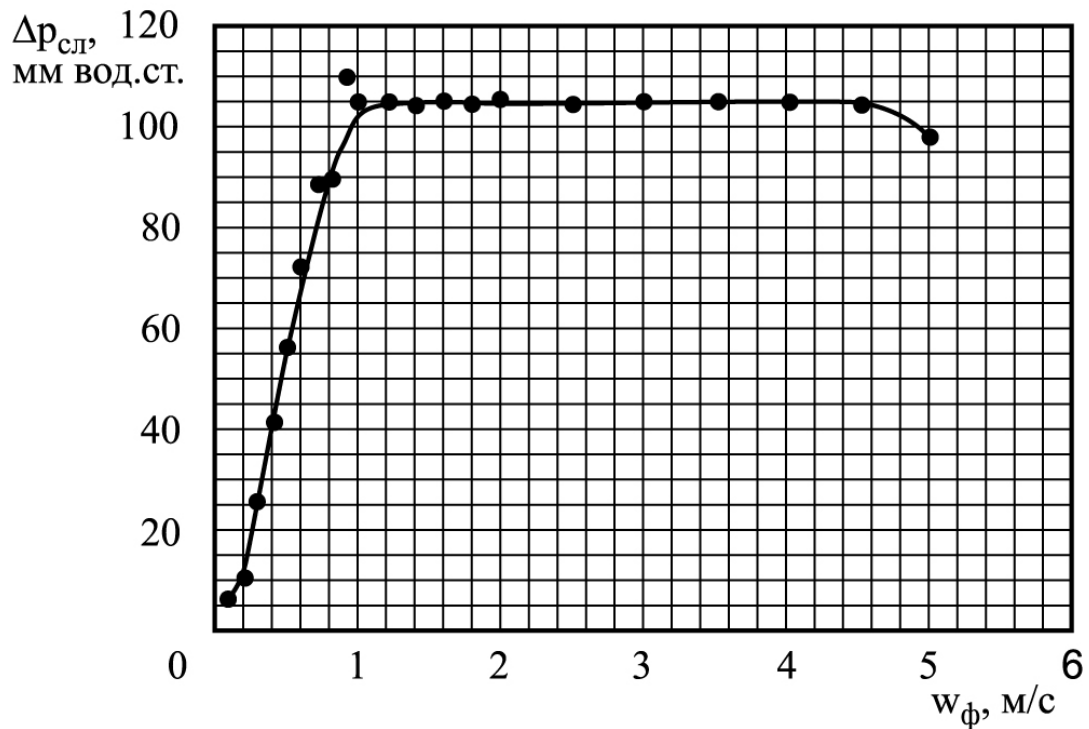


Рис. 14. График зависимости сопротивления кипящего слоя от скорости воздуха

5. По найденному критерию Архимеда определить средний диаметр частиц:

$$d_{ш} = \sqrt[3]{\frac{Ar \cdot v_{cp}^2 \cdot \rho_{cp}}{\rho_m \cdot g}}, \quad (21)$$

6. По графику (рис. 13) $Ly = f(Ar)$ найти предельное значение критерия Лященко при $\varepsilon = 1$, позволяющее определить скорость уноса $w_{ун}$ и расход воздуха L , при котором происходит унос из колонки загруженных в нее твердых частиц.

7. По формуле (13) определить массу слоя частиц и сравнить с величиной, полученной путем непосредственного взвешивания.

8. Для каждого опыта определить число псевдоожижения K по формуле (17) и порозность слоя по уравнению (16) и по экспериментальным данным:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta p_{cl}}{H \cdot \rho_m}, \quad (22)$$

где Δp_{cl} - гидравлическое сопротивление слоя, мм вод. ст.;
 H - высота кипящего слоя, м.

Необходимые для расчетов значения плотности и вязкости воздуха берут из прил. 1.

В отчет о работе должны входить: схема установки; журнал наблюдений; графики зависимостей Δp_{cl} и высоты слоя H от скорости воздуха w_ϕ ; соответствующие расчеты диаметров частиц, расхода воздуха и т.д.

Пример обработки опытных данных

1. Насыпная плотность навески стеклянных шариков ($\rho_m = 2450 \text{ кг/м}^3$):

$$\rho_{nc} = \frac{G_m}{V_0} = \frac{16,85 \cdot 10^{-3}}{12128 \cdot 10^{-9}} = 1389 \text{ кг/м}^3.$$

2. Масса частиц, находящихся в трубе в неподвижном слое материала

$$G_m = \rho_{nc} \cdot V_0 = \frac{\rho_{nc} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H_0}{4} = \frac{1389 \cdot 3,14 \cdot (40 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,075}{4} = 131 \text{ г}.$$

3. Порозность насыпного слоя

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{nc}}{\rho_m} = 1 - \frac{1389}{2450} = 0,43 \approx 0,4.$$

4. Критическая скорость воздуха $w_{кр} = 0,9 \text{ м/с}$ (по графику $\Delta p_{cl} = f(w_\phi)$ рис.14).

5. Критерий Лященко при $w_{кр}$

$$Ly_{кр} = \frac{w_{кр}^3 \cdot \rho_{cp}}{v_{cp} \cdot \rho_m \cdot g} = \frac{0,9^3 \cdot 1,185}{15,61 \cdot 10^{-6} \cdot 2450 \cdot 9,81} = 2,3.$$

6. Критерий Архимеда при $\varepsilon_0 = 4$ (по графику $Ly = f(Ar)$ (рис.13)

$$Ar = 8 \cdot 10^5$$

7. Средний диаметр частиц исследуемого материала

$$d_{ш} = \sqrt[3]{\frac{Ar \cdot v_{cp}^2 \cdot \rho_{cp}}{\rho_m \cdot g}} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 10^3 \cdot 15,61 \cdot 10^{-6} \cdot 2450 \cdot 1,185}{2450 \cdot 9,81}} = 2,29 \text{ мм.}$$

8. Максимальное значение критерия Лященко при $\varepsilon_0 = 4$
(по графику $Ly = f(Ar)$ (рис.13)

$$Ly_{\max} = 5 \cdot 10^3.$$

9. Скорость уноса частиц материала из слоя

$$w_{yh} = \sqrt[3]{\frac{Ly_{\max} \cdot v_{cp} \cdot \rho_m \cdot g}{\rho_m}} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 10^3 \cdot 15,61 \cdot 10^{-6} \cdot 2450 \cdot 9,81}{1,185}} = 11,65 \text{ м/с.}$$

10. Объемный расход воздуха L , при котором происходит унос из колонки загруженных в нее твердых частиц,

$$L = f \cdot w_{yh} = \frac{w_{yh} \cdot \pi \cdot D^2}{4} = \frac{11,65 \cdot 3,14 \cdot (40 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,015 \text{ м}^3 / \text{с.}$$

11. Значение критерия $Re_{кр}$ в начале псевдодвижения:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} = \frac{8 \cdot 10^5}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{8 \cdot 10^5}} = 131,8.$$

12. Расчетная критическая скорость воздуха

$$\omega_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot v_{cp}}{d_{ш}} = \frac{131,8 \cdot 15,61 \cdot 10^{-6}}{2,29 \cdot 10^{-3}} = 0,89 \text{ м/с.}$$

13. Порозность кипящего слоя при высоте $H=0,125$ м
(см. рис.15)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta p_{сн}}{H \cdot \rho_M} = 1 - \frac{105}{2450 \cdot 0,125} = 0,66.$$

14. Порозность кипящего слоя по уравнению (16) при скорости $w_\phi = 3,5$ м/с (рис.15)

$$\varepsilon = \left(\frac{18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2}{Ar} \right)^{0,21} = \left(\frac{18 \cdot 513,5 + 0,36 \cdot 513,5^2}{8 \cdot 10^5} \right)^{0,21} = 0,65,$$

где критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{w_\phi \cdot d_{ш}}{\nu_{ср}} = \frac{3,5 \cdot 2,29 \cdot 10^{-3}}{15,61 \cdot 10^{-6}} = 513,5.$$

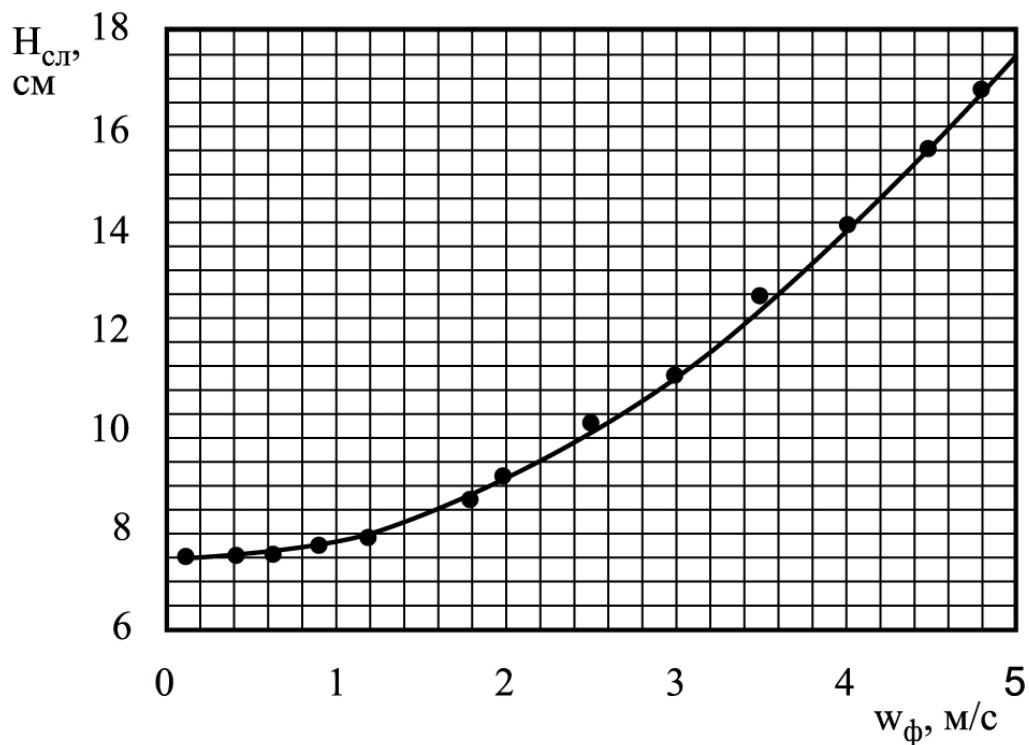


Рис. 15. График зависимости высоты кипящего слоя от скорости воздуха

15. Число псевдоожижения при скорости $w_\phi = 3,5$ м/с

$$K = \frac{w_\phi}{w_{кр}} = \frac{3,5}{0,9} = 3,9.$$

16. Масса частиц в слое кипящего материала

$$G_m = \Delta p_{cn} \cdot f = \frac{\Delta p_{cn} \cdot \pi \cdot D^2}{4} = \frac{105 \cdot 3,14 \cdot (40 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 132 \text{ г.}$$

Контрольные вопросы к работе № 2

1. *Что такое фиктивная, действительная и критическая скорость газа?*
2. *Что такое порозность слоя? В каких пределах изменяется порозность взвешенного слоя?*
3. *Как изменяется с возрастанием фиктивной скорости газа его действительная скорость в неподвижном и взвешенном слоях?*
4. *Какой характер имеет зависимость порозности слоя от расхода газа?*
5. *При каком соотношении действующих сил твердые частицы переходят во взвешенное состояние?*
6. *От чего зависят значения критической скорости и скорости уноса?*
7. *Почему с увеличением фиктивной скорости воздуха гидравлическое сопротивление неподвижного слоя растет, а сопротивление взвешенного слоя остается постоянным?*
8. *Почему критическая скорость воздуха практически не зависит от высоты слоя?*
9. *При данном расходе воздуха порозность взвешенного слоя будет больше для крупных частиц или для мелких?*
10. *Что такое насыпная плотность материала?*
11. *Что такое число псевдооживления?*
12. *Как рассчитать гидравлическое сопротивление взвешенного слоя, зная вес неподвижного слоя?*

Лабораторная работа № 3

Испытание цилиндроконической сушилки с взвешенным слоем сыпучего материала

Сушка влажных материалов является одним из широко распространенных технологических процессов во многих отраслях промышленности. Разнообразие свойств материалов, подвергающихся сушке, вызывает необходимость создания различных конструкций сушильных аппаратов. Одной из таких конструкций является установка для сушки материала во взвешенном слое. Такие установки 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.

По физической схеме взаимодействия влажной частицы с потоком сушильного агента сушка во взвешенном слое является разновидностью процесса конвективной сушки.

Цель работы — ознакомление с работой сушилки взвешенного слоя, определение основных характеристик и методов расчета периодического процесса сушки.

Описание установки

Установка (рис. 4) состоит из вентилятора (1), электрического калорифера (2), шиберной задвижки (4) и сушильной камеры (7). Сушильная камера имеет цилиндроконическую форму и в нижней части снабжена решеткой, предохраняющей материал от проваливания в подводящий воздуховод в случае прекращения подачи сушильного агента. Корпус сушилки выполнен из оргстекла для визуального наблюдения за состоянием слоя высушиваемого материала. Воздух засасывается из помещения вентилятором, подается в электрический калорифер, где нагревается до заданной температуры и далее направляется в сушильную камеру.

Расход воздуха регулируют задвижкой и измеряют с помощью термоанемометра (12). Температуру воздуха перед сушилкой измеряют термометром (11) и регулируют, включая и выключая калорифер. Влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер и покидающего сушильную камеру, определяют по показаниям психрометра (15) и с помощью термопар сухого и смоченного термометра (16).

Методика проведения лабораторной работы

Взвешивают массу зернистого материала (примерно 200 г) и загружают в сушильную камеру. Поворотом рубильника на щите подключают установку к электросети. Нажатием кнопки включают вентилятор. Открывают задвижку на соседней установке для выброса воздуха в атмосферу. Включают электрокалорифер и разогревают установку. По термометру (11) следят за тем, чтобы температура воздуха после калорифера не превышала 50°C во избежание перегрева термоэлектронагревателей (ТЭН'ов) калорифера. Выключая и вновь включая электрокалорифер, поддерживают температуру сушильного агента постоянной. При помощи пипетки смачивают батистовый колпачок, надетый на ртутный резервуар мокрого термометра-психрометра (для определения влагосодержания наружного воздуха), и марлю, прилегающую к спаям термопары (для определения влагосодержания воздуха на выходе из установки). Заводят пружинный вентилятор психрометра; включают самопишущий потенциометр для регистрации температур измеряемых термопарами. Увлажняют слой материала, находящегося в установке (примерно 50 г воды). Открывают шиберную задвижку на входе в цилиндроконическую сушилку (одновременно закрывая байпас), добиваясь кипения или фонтанирования слоя материала.

Как только через слой влажного материала начинает проходить сухой горячий воздух, температура последнего на выходе из сушилки снижается, достигая температуры смоченного термометра (рис. 16). После того как показания сухого и смоченного термометров на выходе из сушилки стабилизируются, можно считать, что аппарат вышел на установившийся режим работы.

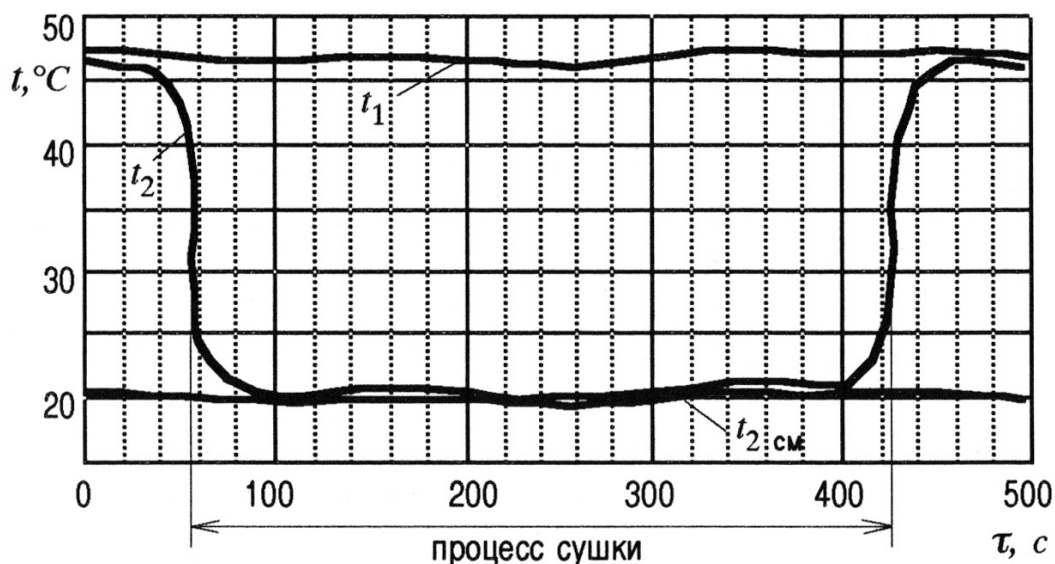


Рис. 16. Изменение температуры сушильного воздуха в процессе сушки дисперсного материала:

t_x - температура воздуха на входе в сушилку; t_2 - температура воздуха на выходе из сушилки; $t_{2см}$ - температура воздуха по смоченному термометру на выходе из сушилки

В течение всего опыта следят за показаниями контрольно-измерительных приборов, поддерживают температуру воздуха на входе в сушильную камеру, фиксируют показания психрометра и заносят в журнал наблюдений (табл. 3). В процессе опыта измерение скорости воздуха в выходном отверстии сушилки производят с помощью ручного чашечного анемометра.

Когда поверхностная влага материала испарится, температура воздуха на выходе становится практически равной температуре воздуха на входе в установку. После этого снимают предохранительный колпачок с термоанемометра, устанавливают его датчик напротив выходного отверстия сушилки и измеряют скорость воздуха в режиме ручной термокомпенсации. Измерение скорости воздуха термоанемометром в процессе испарения влаги связано с большой погрешностью, так как его датчик будет сильнее охлаждаться в среде влажного воздуха (см. принцип работы термоанемометра), при этом прибор будет показывать завышенные значения скорости.

После окончания опыта выключают электрокалорифер и открывают все шиберные заслонки для быстрого охлаждения установки. Снимают диаграммную ленту с потенциометра и

выключают его. Когда температура воздуха после калорифера снизится до 30°C , выключают вентилятор и отключают установку от электросети.

Таблица 3

Журнал наблюдений

№ п/п	Показания психрометра в помещении, $^{\circ}\text{C}$		Температура на выходе из калорифера, $^{\circ}\text{C}$	Показания термопар на выходе из сушилки, $^{\circ}\text{C}$		Скорость воздуха на выходе из сушилки, м/с
	t_0	$t_{0см}$	t_1	t_2	$t_{2см}$	$w_в$
1						
2						
3						
....						

Обработка опытных данных

1. Используя имеющиеся данные и показания контрольно-измерительных приборов, наносят на I-d диаграмму (рис. 17) параметры наружного воздуха (точка 0) на входе (точка 1) и выходе (точка 2) из сушилки и определяют соответствующие значения влагосодержания d_0 и d_2 .

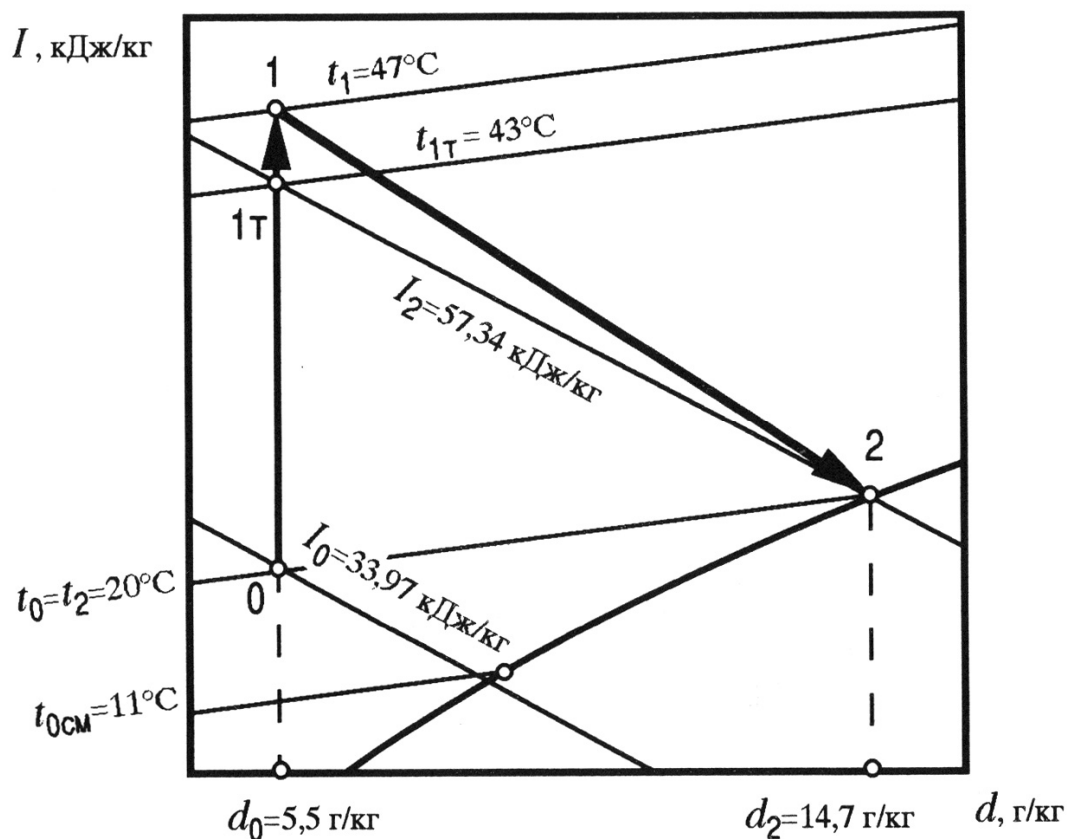


Рис. 17. Изменение параметров сушильного воздуха на I-d диаграмме

2. Рассчитывают расход влажного отработавшего воздуха

$$L_{omp} = F \cdot \rho_{\epsilon}^{\epsilon n} \cdot w_{\epsilon}, \quad (23)$$

где $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ — площадь сечения выходного отверстия сушильной камеры; D — внутренний диаметр выходного отверстия (берется из табл. 1), p_0 — плотность воздуха при нормальных условиях, $p_{\theta}^{в\lambda}$ — плотность влажного воздуха рассчитывается по формуле

$$p_{\epsilon}^{6l} = \frac{p_0 \cdot 273 \cdot 622 \cdot (1 + d_2 \cdot 10^{-3})}{(273 + t_2) \cdot (622 + d_2 \cdot 10^{-3})}. \quad (24)$$

3. Расход абсолютно сухого воздуха

$$L_{cyx} = \frac{L_{omp}^{en}}{(1 + d_2 \cdot 10^{-3})}. \quad (25)$$

4. Удельный расход воздуха (на 1 кг испаренной влаги)

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0}. \quad (26)$$

5. Производительность сушилки по испаренной влаге

$$W = \frac{L_{\text{сух}}}{l}. \quad (27)$$

6. Масса испаренной влаги

$$G_{\text{вп}} = W \cdot \tau \quad (28)$$

где τ - длительность сушки (см. рис. 16).

7. Начальное влагосодержание материала

$$u_0 = G_{\text{вп}} / G_{\text{сух}}. \quad (29)$$

8. Расход теплоты на сушку (теплота подводимая в электрокалорифере)

$$Q = L_{\text{сух}} \cdot (c_{\text{в}} + c_{\text{н}} \cdot d_0 \cdot 10^{-3}) \cdot (t_1 - t_0), \quad (30)$$

где $c_{\text{в}}$, и $c_{\text{н}}$ — соответственно теплоемкости сухого воздуха и водяного пара.

9. Удельный расход теплоты (на 1 кг испаряемой влаги)

$$q = Q / W. \quad (31)$$

10. Удельная теплота парообразования при температуре смоченного термометра $t_{2\text{см}}$ воздуха выходящего из сушилки

$$r = i_0 + c_{\text{н}} \cdot t_{2\text{см}} - c_{\text{в}} \cdot t_{2\text{см}}, \quad (32)$$

где i_0 — удельная энтальпия сухого насыщенного пара при 0°C и нормальном давлении; $c_{\text{в}}$ - теплоемкость воды.

11. Термический КПД сушильной установки

$$\eta = r / q. \quad (33)$$

Строят на I-d диаграмме Рамзина (рис. 17) процесс изменения свойств сушильного агента, используя известные значения температур: t_0 , $t_{0\text{см}}$, t_1 , t_2 , $t_{2\text{см}}$ и соответствующие значения влагосодержания d_0 и d_2 . По результатам построения определяют удельный расход теплоты q_t и коэффициент полезного действия η_t

теоретической сушилки, т. е. такой сушилки, в которой вся теплота, отданная воздухом, идет на испарение влаги ($I_{2T} = I_2$). При тех же характеристиках сушильного агента на входе и выходе из установки в теоретической сушилке температура воздуха после калорифера t_{1T} может быть ниже, чем в реальной установке t_1 :

$$q_t = \frac{1000 \cdot (I_2 - I_0)}{d_2 - d_0}, \quad (34)$$

$$\eta_t = r / q_t. \quad (35)$$

Значения энтальпии воздуха I_0 , I_2 и температуры t_{1T} определяют по I - d диаграмме или из уравнения

$$I = c_s \cdot t + (i_0 + c_n \cdot t) \cdot d \cdot 10^{-3}. \quad (36)$$

В отчет о работе должны входить: схема установки; журнал наблюдений; приведенные выше расчеты; изображение действительного и теоретического процессов сушки в I-d координатах. I-d диаграмма приведена в прил. 3.

Пример обработки опытных данных

1. Параметры наружного воздуха (точка 0): $t_0 = 20^\circ\text{C}$; $t_{0cm} = 11^\circ\text{C}$; $d_0 = 5,5 \text{ г/кг}$; параметры воздуха после калорифера (точка 1): $t_1 = 47^\circ\text{C}$; параметры воздуха на выходе из сушилки (точка 2): $t_2 = 20^\circ\text{C}$; $t_{2cm} = 20^\circ\text{C}$; $d_2 = 14,7 \text{ г/кг}$ (рис. 17).

2. Расход влажного отработавшего воздуха

$$L_{omp}^{en} = F \cdot \rho_s^{en} \cdot w_s = 0,0048 \cdot 1,22 \cdot 2,7 = 0,0158 \text{ кг/с},$$

где $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,0078^2}{4} = 0,0048 \text{ м}^2$,

$$\rho_s^{en} = \frac{\rho_0 \cdot 273 \cdot 622 \cdot (1 + d_2 \cdot 10^{-3})}{(273 + t_2) \cdot (622 + d_2 \cdot 10^{-3})} = \frac{1,293 \cdot 273 \cdot 622 \cdot (1 + 14,7 \cdot 10^{-3})}{(273 + 20) \cdot (622 + 14,7 \cdot 10^{-3})} = 1,22 \text{ кг/м}^3$$

3. Расход абсолютно сухого воздуха

$$L_{\text{сух}} = \frac{L_{\text{опр}}^{\text{ен}}}{(1 + d_2 \cdot 10^{-3})} = \frac{0,0158}{1 + 14,7 \cdot 10^{-3}} = 0,01557 \text{ кг/с.}$$

4. Удельный расход воздуха

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0} = \frac{1000}{14,7 - 5,5} = 108,7 \text{ кг воз/кг вл.}$$

5. Производительность сушилки по испаренной влаге

$$W = \frac{L_{\text{сух}}}{l} = \frac{0,01557}{108,7} = 0,000143 \text{ кг вл/с.}$$

6. Масса испаренной влаги

$$G_{\text{ен}} = W \cdot t = 0,000143 \cdot 348 = 0,0498 \approx 50 \text{ г.}$$

7. Начальное влагосодержание материала

$$u_0 = G_{\text{ен}} / G_{\text{сух}} = 50 / 177 = 0,282 \text{ кг/кг.}$$

8. Расход теплоты на сушку

$$Q = L_{\text{сух}} \cdot (c_{\text{в}} + c_n \cdot d_0 \cdot 10^{-3}) \cdot (t_1 - t_0) = 0,01557 \cdot (1 + 2 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (47 - 20) = 0,425 \text{ кВт.}$$

9. Удельный расход теплоты

$$q = Q / W = 0,425 / 0,000143 = 2972 \text{ кДж/кг вл.}$$

10. Удельная теплота парообразования при температуре смоченного термометра $t_{2\text{см}}$ воздуха, выходящего из сушилки

$$r = i_0 + c_n \cdot t_{2\text{см}} - c_w \cdot t_{2\text{см}} = 2500 + 2 \cdot 20 - 4,19 \cdot 20 = 2456 \text{ кДж/кг вл.}$$

11. Термический КПД действительной сушильной установки

$$\eta = r / q = 2456 / 2972 = 0,826 \approx 83\%.$$

12. Энтальпия наружного воздуха

$$I_0 = c_{\text{в}} \cdot t_0 + (i_0 + c_n \cdot t_0) \cdot d_0 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 20 + (2500 + 2 \cdot 20) \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} = 33,97 \text{ кДж/кг.}$$

13. Энтальпия отработавшего воздуха

$$I_2 = c_{\text{в}} \cdot t_2 + (i_2 + c_n \cdot t_2) \cdot d_2 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 20 + (2500 + 2 \cdot 20) \cdot 14,7 \cdot 10^{-3} =$$

= 57,34 кДж/кг.

14. Удельный расход теплоты в теоретической сушильной установке

$$\eta_t = r / q_t = 2456 / 2540 = 0,976 \approx 97\%.$$

15. Термический КПД теоретической сушильной установки

$$\eta_t = r / q_t = 2456 / 2540 = 0,976 \approx 97\%.$$

16. Температура воздуха после калорифера в теоретической сушильной установке

$$t_{1t} = \frac{I_2 - i_0 \cdot d_0 \cdot 10^{-3}}{c_g + c_n \cdot d_2 \cdot 10^{-3}} = \frac{57,34 - 2500 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3}}{1 + 2 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3}} = 43,1^\circ\text{C}.$$

Контрольные вопросы к работе № 3

1. В чем состоит преимущество сушки во взвешенном слое по сравнению с сушкой того же материала в неподвижном слое?
2. Почему для сушки полидисперсных материалов целесообразно применять сушилки цилиндроконической формы?
3. Что такое удельный расход воздуха и удельный расход теплоты?
4. Какие температуры определяются психрометром?
5. Как определяются параметры сушильного агента на $I - d$ диаграмме по показаниям психрометров?
6. Чем отличается теоретическая сушилка от действительной и как изображаются на диаграмме Рамзина теоретический и действительный процессы сушки?
7. Каков физический смысл понятия тепловой КПД сушилки?
8. Назовите конструкции промышленных сушилок с взвешенным слоем непрерывного действия.

Лабораторная работа № 4

Моделирование работы сушильной установки с кипящим слоем и определение основных характеристик циклона

Работа состоит из двух частей:

А) В первой демонстрационно-расчетной части изучают работу установки с кипящим слоем и рассчитывают рабочую высоту слоя.

В кипящем слое каждая частица интенсивно омывается потоком газа. Скорость омывания имеет пульсирующий характер, что интенсифицирует тепломассообменные процессы. В процессе теплообмена происходит соударение частиц и вследствие этого - турбулизация пограничного слоя. В единице объема аппарата одновременно находится большое количество частиц, поверхность которых участвует в теплообмене.

Совокупность высоких теплообменных коэффициентов (6-11 кВт/м³К) и больших поверхностей раздела фаз в установках с кипящим слоем обуславливает интенсивность процессов тепло- и массообмена, отнесенную к 1 м³ аппарата.

Длительность сушки материала в кипящем слое можно определить из совместного решения уравнений теплового баланса и теплообмена

$$dQ = -\overline{c}_Г \cdot G_Г \cdot d_T, \quad (37)$$

$$dQ = \alpha \cdot F_M \cdot (t_Г - t_M) \cdot d_T, \quad (38)$$

где Q - количество теплоты, передаваемое от сушильного агента к поверхности материала, Вт; $\overline{c}_Г$ - средняя теплоемкость сушильного агента, кДж/кг К; $G_Г$ - масса сушильного агента, кг; $t_Г$, t_M - соответственно температуры сушильного агента и материала, К; F_M - поверхность материала, м²; α - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²К; τ - длительность сушки, с.

Из совместного решения уравнений (37) и (38) рассчитывают длительность сушки влажного материала:

$$\tau = -\frac{\overline{c}_Г \cdot G_Г}{\alpha \cdot F_M} \cdot \int_{t_Г^{6blx}}^{t_Г^{6x}} \frac{dt_Г}{(t_Г - t_M)} = \frac{\overline{c}_Г \cdot G_Г}{\alpha \cdot F_M} \cdot \ln \frac{(t_Г^{6x} - t_M)}{(t_Г^{6blx} - t_M)}. \quad (39)$$

Поверхность материала можно выразить через его дисперсность и размеры аппарата кипящего слоя

$$F_M = S \cdot V_M = \frac{6 \cdot V_M}{\varphi_S \cdot d_з} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot H \cdot F_P}{\varphi_S \cdot d_з}, \quad (40)$$

где S - дисперсность материала, $\text{м}^2/\text{м}^3$; F_p - площадь газораспределительной решетки, на которой находится кипящий слой материала, м^2 ; H - высота кипящего слоя, м ; φ_s , d_s - соответственно коэффициент формы и эквивалентный диаметр (м) частиц материала.

При расчетах аппаратов кипящего слоя определяют рабочую высоту слоя H . Заменяя массу сушильного агента на его расход $L_\Gamma = G_\Gamma / \tau$, из уравнения (39) учетом (40)

$$H = \frac{\varepsilon_\Gamma \cdot L_\Gamma \cdot \varphi_s \cdot d_s}{6 \cdot \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \cdot F_p} \cdot \ln \frac{(t_\Gamma^{\text{ex}} - t_M)}{(t_\Gamma^{\text{btx}} - t_M)}, \quad (41)$$

Коэффициент конвективного теплообмена рассчитывается из критериальной зависимости

$$Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{1,3} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } Re < 200 \quad (42)$$

или

$$Nu = 0,4 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{0,67} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } Re \geq 200. \quad (43)$$

Критерий Нуссельта определяется соотношением

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_s}{\lambda_\Gamma}, \quad (44)$$

где λ_Γ - коэффициент теплопроводности сушильного агента, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$.

Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu_r}{\alpha} = \frac{\nu_r \cdot c_r \cdot \rho_r}{\lambda_r}, \quad (45)$$

где ρ_r - плотность газов, $\text{кг}/\text{м}^3$; ν_r - коэффициент кинематической вязкости газов, $\text{м}^2/\text{с}$; α - коэффициент температуропроводности газов, $\text{м}^2/\text{с}$. Остальные обозначения прежние.

Цель первой части работы — практическое изучение работы установки кипящего слоя и ознакомление с методикой ее расчета на основе балансовых уравнений и критериальных зависимостей.

Б) Во второй части работы изучают работу циклона.

Надежность работы сушильной установки зависит от правильно подобранного вспомогательного оборудования, в том числе циклонов. Циклоны служат для очистки отработавших газов, улавливания частиц ценных или токсичных материалов на выходе из сушилки. Конструкции циклонов разнообразны, но в промышленной практике наибольшее распространение получили центробежные циклоны.

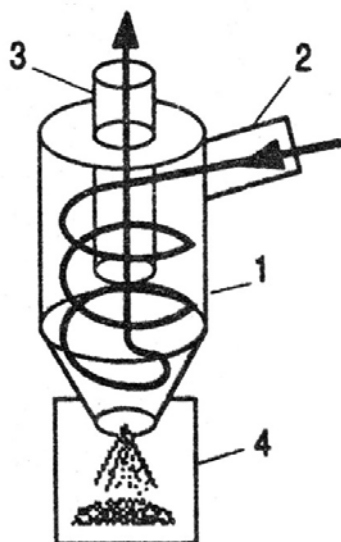


Рис. 18. Принципиальная схема работы циклона:

1 - корпус циклона; 2 - входной патрубок; 3 - выхлопная труба;
4 - бункер-сборник уловленных твердых частиц

На рис. 18 показана принципиальная схема работы циклона. Циклон состоит из цилиндроконического корпуса 1; входного патрубка 2 прямоугольного сечения, встроенного по касательной к окружности цилиндрической части корпуса; выхлопной трубы 3, расположенной по оси циклона. Нижний конец конической части корпуса циклона входит в бункер 4, предназначенный для сбора уловленных твердых частиц. Запыленный воздух (газы) входит в циклон через тангенциально встроенный патрубок 2 и, приобретая вращательное движение, опускается спирально вниз вдоль внутренней поверхности стенок цилиндрической и конической частей корпуса аппарата. Вращаясь вначале в кольцевом пространстве, образованном цилиндрической частью корпуса циклона и выхлопной трубой, а затем в зоне, расположенной ниже торца выхлопной трубы, газовый поток образует внешний вращающийся вихрь. При этом развиваются центробежные силы, под воздействием которых твердые частицы, находящиеся в газовом потоке и обладающие значительно большей плотностью,

чем газ, отбрасываются к стенкам корпуса циклона. Движение твердых частиц по внутренней поверхности циклона к бункеру 4 обусловлено не только влиянием силы тяжести, но и воздействием силы давления газового потока, направленного вниз. Достигнув нижнего торца конической части корпуса циклона, твердые частицы поступают в бункер 4.

В конической части корпуса циклона газовый поток начинает менять направление и перемещаться вверх к выхлопной трубе, образуя внутренний вращающийся вихрь. Освобожденный от основной массы твердых частиц, воздушный поток попадает в выхлопную трубу 3 и, поднимаясь по ней винтообразно вверх, удаляется из циклона.

Процесс разделения неоднородных систем газ - твердые частицы под действием центробежных сил обуславливается разностью плотностей газового потока и твердых частиц, находящихся во вращательном движении. Центробежные силы, возникающие при этом, обеспечивают большую эффективность процесса по сравнению с процессом разделения, проходящим в поле действия только сил тяжести. Соотношение этих сил называется фактором разделения:

$$f = \frac{P_{ц}}{G} = \frac{m \cdot w^2 / R}{m \cdot g} = \frac{w^2}{R \cdot g}. \quad (46)$$

Здесь $P_{ц}$ - центробежная сила, отбрасывающая твердую частицу из вращающегося газового потока к стенкам циклона; G - сила тяжести; m - масса твердой частицы, кг; w - окружная скорость частицы (условно принимается равной скорости газового потока во входном патрубке циклона, м/с; R - радиус циклона, м.

Из выражения (46) видно, что эффективность разделения возрастает с увеличением скорости газового потока и уменьшением радиуса циклона. Однако значительное увеличение скорости связано с резким возрастанием гидравлического сопротивления циклона и усилением местных завихрений, срывающих уже осевшие на внутренней поверхности циклона твердые частицы, что приводит к ухудшению очистки газа.

Работа циклона оценивается по совокупности его основных характеристик: эффективности разделения (степени очистки или коэффициента полезного действия) и гидравлического сопротив-

ления (достижение высокой степени очистки при малом гидравлическом сопротивлении).

Степень очистки (%) можно рассчитать, зная начальную C_n и конечную C_k концентрацию твердых частиц в газовом потоке, проходящем через циклон

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100 \quad (47)$$

или

$$\eta = \frac{G_n - G_k}{G_n} \cdot 100 = \frac{G_{ул}}{G_n} \cdot 100, \quad (48)$$

где G_n - массовый расход твердых частиц на входе в циклон, кг/с;
 G_k - массовый расход твердых частиц на выходе из циклона, кг/с;
 $G_{ул}$ - массовый расход уловленных твердых частиц, кг/с.

Степень очистки газового потока зависит от размера и плотности твердых частиц, от плотности и вязкости газового потока, от типа циклона, его геометрических размеров, от скорости газового потока на входе в циклон и от величины $\Delta P_{ц}/\rho$ (рис. 19). Наилучшие условия очистки запыленного газа обеспечиваются, как показывают данные по эксплуатации циклонов, при значениях $\Delta P_{ц}/\rho$ в интервале 500 - 750 м²/с². Выше этих значений будет перерасход электроэнергии при практически постоянной степени очистки η , ниже этих значений степень очистки циклона будет заметно снижаться.

Общее гидравлическое сопротивление циклона можно представить как сумму потерь давления на преодоление сопротивления трения и местных сопротивлений, а именно: потери давления на входе в циклон; потери давления на преодоление сопротивления трения в корпусе циклона; потери давления при переходе газового потока из внешней зоны циклона большего диаметра во внутреннюю зону (в выхлопную трубу) с поворотом на 180°; потери давления на преодоление сопротивления трения в выхлопной трубе.

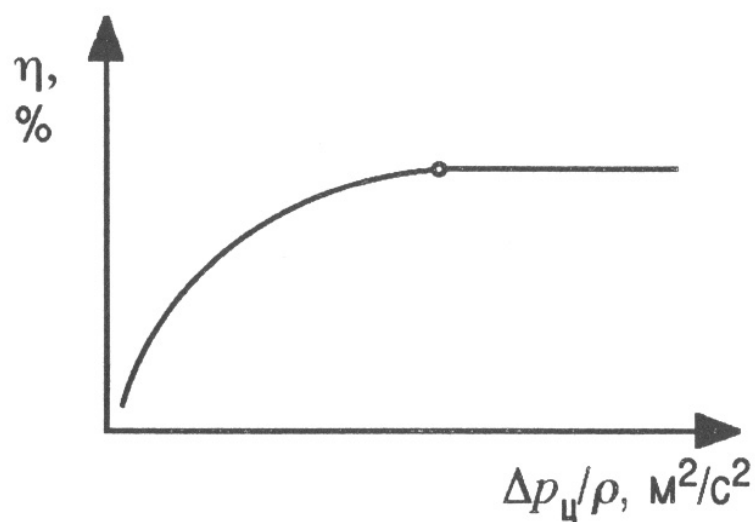


Рис. 19. Зависимость степени очистки η от величины $\Delta P_{\text{ц}}/\rho$

При расчете общего гидравлического сопротивления циклона чаще его определяют как функцию условной скорости газа w , отнесенной к площади свободного поперечного сечения цилиндрической части корпуса циклона:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \frac{p_{\text{г}} \cdot w_{\text{ц}}^2}{2} \cdot \xi_{\text{ц}}, \quad (49)$$

где $\xi_{\text{ц}}$ - коэффициент гидравлического сопротивления циклона.

Условная скорость газа в циклоне $w_{\text{ц}}$, обеспечивающая высокую степень очистки, лежит в пределах 3 - 3,5 м/с и рассчитывается по уравнению:

$$w_{\text{ц}} = \frac{V}{0,785 \cdot D_{\text{ц}}^2}, \quad (50)$$

где $D_{\text{ц}}$ - диаметр циклона, м; V - расход газа, м³/с.

Значение коэффициента $\xi_{\text{ц}}$ зависит от конструктивных особенностей циклона и для стандартных циклонов типа ЦН находится в пределах 60-105.

Цель второй части работы — практическое ознакомление с работой циклона, исследование зависимости степени очистки циклона и его гидравлического сопротивления $\Delta P_{\text{ц}}$ от условной скорости газового потока в циклоне; определение гидравлического сопротивления циклона.

Описание лабораторной установки

Установка (рис. 4) состоит из центробежного вентилятора (1), соединительных воздуховодов (2), шиберной задвижки (4), цилиндроконического сосуда с воздухораспределительной решеткой (8), циклона (9), бункера для сбора частиц, уловленных циклоном (19). В гнибе воздуховода, соединяющего выходной патрубок цилиндроконического сосуда и входной патрубок циклона, установлена трубка с воронкой для подачи в циклон (за счет эжектирующего эффекта) мелкодисперсного материала. Выхлопная труба циклона соединена брезентовым рукавом с бункером (20) для сбора частиц, унесенных из циклона с удаляемым воздухом.

Воздух нагнетается вентилятором под решетку, на которой находится псевдоожиженный слой материала. Частицы, уносимые из слоя, улавливаются при помощи циклона.

Расход воздуха в сечении аппарата рассчитывается по скорости, измеряемой термоанемометром (12) в выхлопной трубе циклона. Температура воздуха подаваемого под решетку, определяется по термометру (11). Гидравлическое сопротивление циклона измеряется с помощью U-образного дифманометра (14), подсоединенного на входе в циклон и выходе из него.

Методика проведения работы

А) До начала работы определяют взвешиванием массу G и высоту насыпного слоя материала в установке H_0 (по отметкам на прозрачной стенке цилиндра). Снимают предохранительный колпачок с термоанемометра и устанавливают его датчик напротив выхлопной трубы циклона. Затыкают пробками патрубок циклона для разгрузки материала и эжектирующую трубку для подачи мелкодисперсного материала.

Поворотом рубильника на щите подключают установку к электросети. Нажатием кнопки включают вентилятор. Включают термоанемометр.

Плавными движениями постепенно открывают задвижку регулирующего устройства, изменяя расход воздуха под решетку, наблюдают за состоянием слоя материала.

При достижении скорости воздуха в сечении аппарата критического значения $w_\phi = w_{кр}$, начинается набухание, затем кипение слоя, принимающее все более развитый характер по мере

увеличения расхода воздуха. При достижении скорости воздуха, равной скорости витания (уноса) $w_{\phi} = w_{yn}$, наблюдают за уносом из слоя частиц материала, которые улавливаются циклоном.

В процессе опыта постоянно регистрируют значения скорости воздуха, измеряют высоту кипящего слоя и определяют гидравлическое сопротивление циклона. Данные заносят в журнал наблюдений (табл. 4).

Таблица 4

Журнал наблюдений

№ п/п	Скорость воздуха $W_{оп}$, м/с	Сопротивление циклона $\Delta P_{ц}$, мм. вод. ст.	Высота кипящего слоя H , м
1			
2			
3			

По окончании работы задвижку закрывают и останавливают вентилятор. Открывают выходной патрубок циклона, выгружают материал в бункер, из бункера высыпают обратно в установку.

Б) Во второй части работы исследования проводят на запыленном воздухе при тех же значениях расхода воздуха, что и на первом этапе исследования.

В качестве твердой фазы для создания запыленного воздуха используют мелкий сыпучий материал (например, кварцевый песок). Перед началом опыта массу материала взвешивают.

Закрывают выходной патрубок цилиндроконического сосуда сеткой. Надевают на выхлопную трубу циклона брезентовый рукав, соединенный с бункером для сбора не уловленных циклоном частиц. Вынимают пробку из воронки, соединенной с эжекционной трубкой.

Включают вентилятор, плавно открывают регулируемую задвижку. Засекают время и равномерно ссыпают массу мелкодисперсного материала в воронку с целью сохранения постоянной концентрации твердых частиц в газовом потоке.

Когда весь материал загружен, засекают время и взвешивают массу материала, уловленную циклоном за время опыта. Вентилятор продолжает работать еще некоторое время, затем его останавливают и отключают установку от электросети.

Обработка опытных данных

А) 1. Определить насыпную плотность материала, находящегося в цилиндроконическом сосуде, по формуле (14). Объем, занимаемый материалом в сосуде,

$$V_0 = H_0 \cdot \pi \cdot D^2 / 4, \quad (51)$$

где D - диаметр цилиндрической части сосуда, м (табл. 1).

2. Определить порозность насыпного слоя материала по формуле (15).

3. Определить порозность слоя для режима развитого кипения

$$\varepsilon = 1 - \frac{(1 - \varepsilon_0) \cdot H_0}{H}, \quad (52)$$

где H — высота кипящего слоя, м (по опытным данным).

4. Определить скорость воздуха в сечении аппарата (для того же режима)

$$w_\phi = w_{on} \cdot F_u / F_p, \quad (53)$$

где w_{on} - скорость, измеренная в выхлопной трубе циклона, м/с; F_u , F_p - соответственно площади сечения выхлопной трубы циклона и аппарата кипящего слоя.

5. Рассчитать массовый расход сушильного агента, подаваемого под решетку:

$$L_\Gamma = \rho_\Gamma \cdot w_\phi \cdot F_p. \quad (54)$$

Поскольку работа носит теоретический характер, параметры сушильного агента (ρ_Γ , w_Γ , λ_Γ) определяют из таблицы прил. 1 при температуре t_Γ , заданной преподавателем.

6. Рассчитать критерий Рейнольдса для кипящего слоя.

7. Рассчитать критерий Прандтля по формуле (45).

8. Рассчитать теплообменный критерий Нуссельта по уравнению (42) или (43) в зависимости от величины Re .

9. Определить рабочую высоту слоя материала при заданных условиях по формуле (41).

Вследствие интенсивного перемешивания твердых частиц их температура t_m и влагосодержание практически постоянны по всему объему псевдоожиженного слоя. Температура сушильного агента t_Γ и его влагосодержание d_Γ быстро изменяются в так называемой активной зоне вблизи распределительной решетки и практически неизменны в остальной части слоя. Поэтому температуру материала t_m принимаем постоянной и равной температуре смоченного термометра при температуре сушильного агента на входе в слой. Температуру сушильного агента на выходе из слоя материала t_Γ^{6blx} принимаем на $4 - 5^\circ$ выше температуры материала. Коэффициент формы частиц принимаем равным $\varphi_s = 0,9 - 1$.

Б) 10. Рассчитать объемный расход воздуха через циклон по экспериментальным данным (табл. 4)

$$V = F_u \cdot w_{on}. \quad (55)$$

11. Рассчитать условную скорость воздуха в циклоне по формуле (50).

12. Рассчитать гидравлическое сопротивление циклона по формуле (49).

13. Построить график зависимости $\Delta p_u = f(w_u)$ (рис. 20).

14. Определить отношение $\Delta p_u / \rho_\Gamma$, найти расход уловленного материала (в кг/с)

$$G_{yl} = G / \tau, \quad (56)$$

где G - масса (кг) уловленного твердого материала за время (τ , с) проведения опыта.

15. Рассчитать степень очистки по формуле (48).

16. Построить график зависимости $\eta = f(\Delta p_u / \rho_\Gamma)$ и из него определить оптимальную скорость воздуха, соответствующую высокой степени очистки при малом гидравлическом сопротивлении циклона (рис. 20).

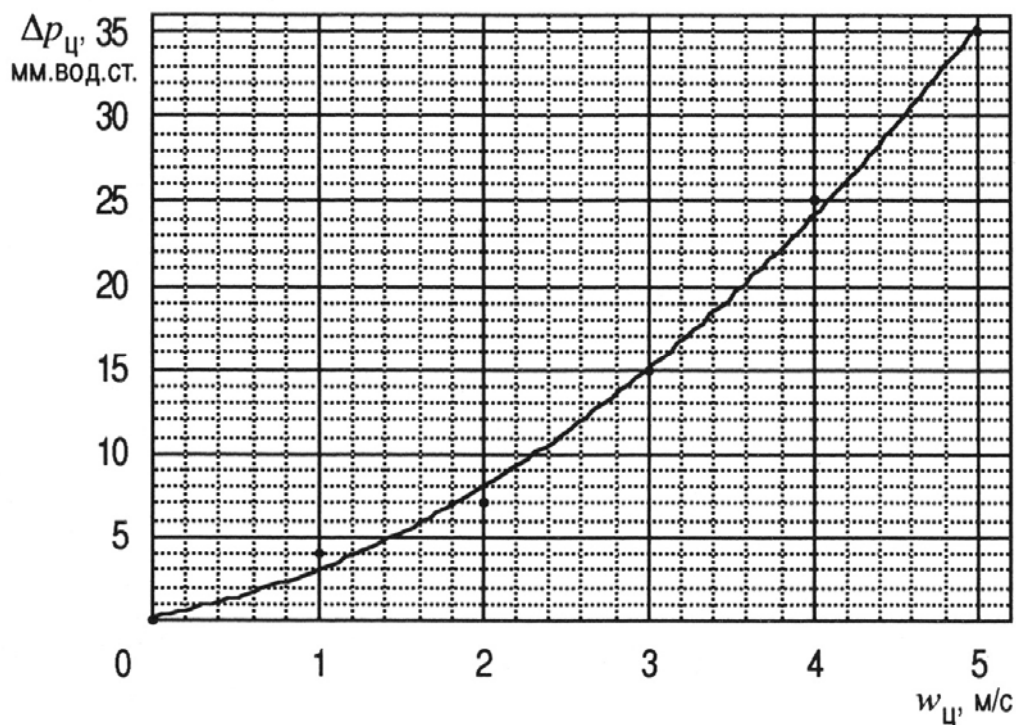


Рис. 20. Зависимость гидравлического сопротивления циклона $\Delta P_{\text{ц}}$ от условной скорости воздуха $w_{\text{ц}}$

Пример обработки опытных данных

1. Объем, занимаемый материалом в сосуде,

$$V_0 = H_0 \cdot \pi \cdot D^2 / 4 = 0,05 \cdot 3,14 \cdot 0,194^2 / 4 = 0,00148 \text{ м}^3.$$

2. Насыпная плотность материала, находящегося в установке,

$$\rho_{\text{нс}} = G_{\text{м}} / V_0 = 0,0266 / 0,00148 = 18 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

3. Порозность насыпного слоя материала плотностью $\rho_{\text{м}} = 30 \text{ кг} / \text{м}^3$

$$\varepsilon_0 = 1 - \rho_{\text{нс}} / \rho_{\text{м}} = 1 - 18 / 30 = 0,4.$$

4. Порозность слоя для режима развитого кипения

$$\varepsilon = 1 - \frac{(1 - \varepsilon_0) \cdot H_0}{H} = 1 - \frac{(1 - 0,4) \cdot 0,05}{0,08} = 0,625.$$

5. Скорость воздуха в сечении аппарата

$$w_{\phi} = w_{\text{он}} \cdot F_{\text{у}} / F_{\text{р}} = 4,5 \cdot 0,00636 / 0,0295 = 0,97 \text{ м} / \text{с}.$$

6. Массовый расход сушильного агента, подаваемого под решетку,

$$L_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \cdot w_{\phi} \cdot F_p = 1,09 \cdot 0,97 \cdot 0,0295 = 0,031 \text{ кг/с.}$$

Параметры воздуха при температуре $t_r = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\rho_r = 1,09 \text{ кг/м}^3$; $\nu_r = 17,95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_r = 2,83 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $c_r = 1,005 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$; $\text{Pr} = 0,698$).

7. Критерий Рейнольдса для частиц $d_{\text{э}} = 0,01 \text{ м}$

$$\text{Re} = \frac{w_{\phi} \cdot d_{\text{э}}}{\nu_r} = \frac{0,97 \cdot 0,01}{17,97 \cdot 10^{-6}} = 540.$$

8. Теплообменный критерий Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,4 \cdot \left(\frac{\text{Re}}{\varepsilon}\right)^{0,67} \cdot \text{Pr}^{0,33} = 0,4 \cdot \left(\frac{540}{0,625}\right)^{0,67} \cdot 0,698^{0,33} = 32,98.$$

9. Коэффициент конвективного теплообмена

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_r}{d_{\text{э}}} = \frac{32,98 \cdot 2,83 \cdot 10^{-2}}{0,01} = 93,32 \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

10. Рабочая высота слоя материала при заданных условиях

$$H = \frac{\overline{c_r} \cdot L_{\Gamma} \cdot \varphi_s \cdot l_{\text{э}}}{6 \cdot \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \cdot F_p} \cdot \ln \frac{(t_{\Gamma}^{\text{вх}} - t_m)}{(t_{\Gamma}^{\text{вых}} - t_m)} = \frac{1005 \cdot 0,31 \cdot 0,9 \cdot 0,01}{6 \cdot 93,32 \cdot (1 - 0,625) \cdot 0,0295} \times \\ \times \ln \frac{50 - 23}{28 - 23} = 0,076 \text{ м.}$$

Контрольные вопросы к работе № 4

1. Что такое дисперсность материала?
2. Как рассчитать поверхность теплообмена в кипящем слое?
3. Напишите уравнения теплового баланса и теплообмена для установки с кипящим слоем.
4. Какие аппараты применяют для улавливания пыли?
5. Как устроен циклон?
6. Что такое фактор разделения?
7. За счет чего в циклоне возникает центробежная сила?
8. Как влияют диаметр циклона и скорость газового потока на его разделяющую способность?
9. Что называется степенью очистки или коэффициентом полезного действия циклона?

10. Что понимают под гидравлическим сопротивлением циклона?

11. Как рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления циклона?

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Физические свойства сухого воздуха ($P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па)

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	P_r
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	25,45	0,686

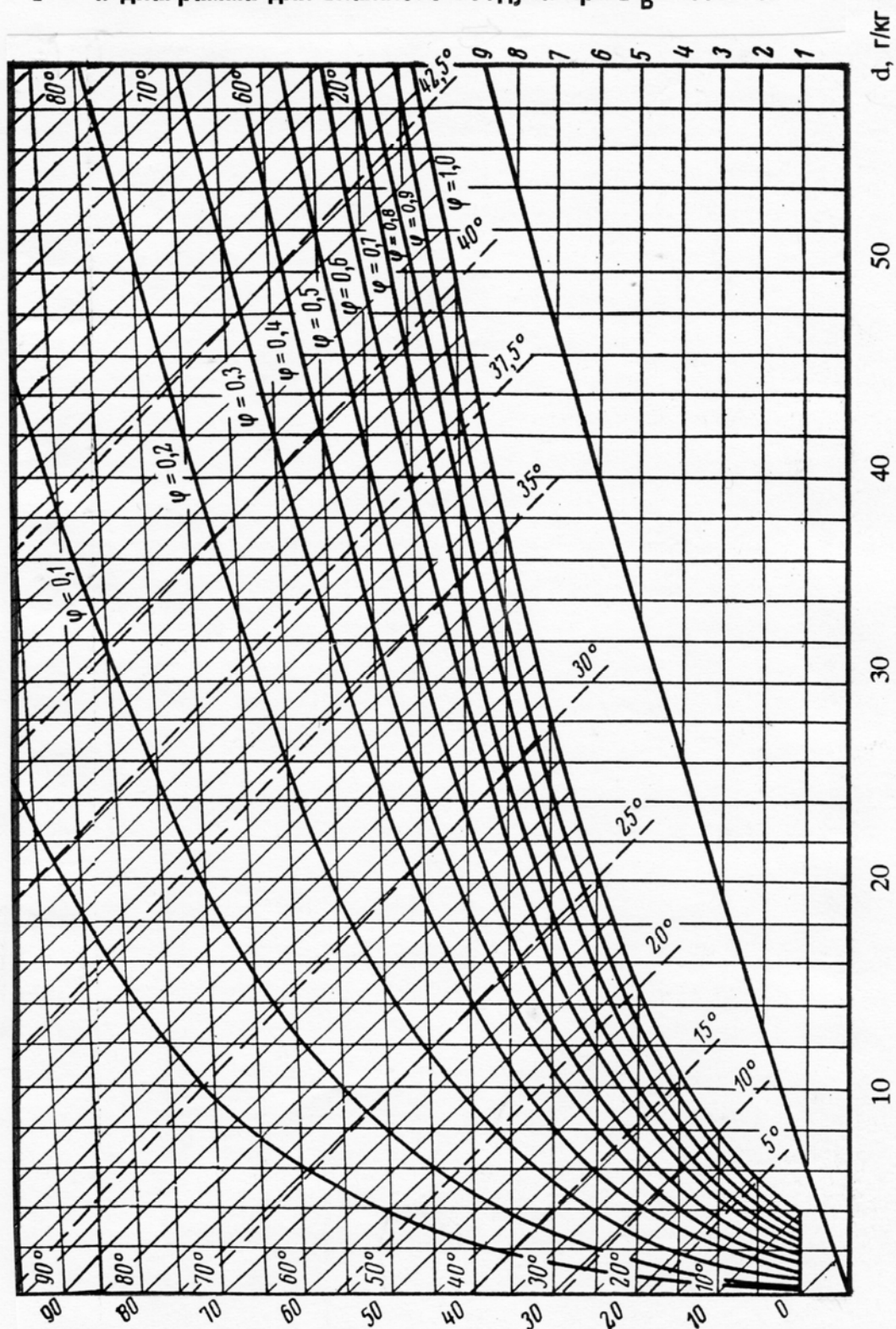
Приложение 2

Плотность различных материалов

Материал	ρ , кг/м ³	Материал	ρ , кг/м ³
Пенопласт	30 - 230	Полипропилен	900 - 910
Пробковая мелочь	45	Полиэтилен	910-960
Хлопковая вата	50	Полистирол	1050 - 1080
Бумага	150	Каучук	1000 - 2000
Опилки	210-300	Сланцы	1100
Целлюлоза (пушонка)	380	Эбонит	1200
Коксовая мелочь	500	Уголь каменный	1300
Асбест	580	Песок речной	1500
Торф	200 - 700	Глина простая	2000
Картон	700	Стекло (пирекс)	2300
Лигнин	600 - 800	Стекло оконное	2500
Уголь (бурый)	800	Руда магнитогорская	3000

Приложение 3

$I - d$ диаграмма для влажного воздуха при $P_B = 100$ кПа



Энтальпия I , кДж/кг сухого воздуха

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н., Громова Е.Н. Тепломассообменное оборудование предприятий (сушильные установки): учеб. пособие. -СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД. -2016.

Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Расчет и проектирование пневматической сушильной установки: учеб.-методическое пособие. - СПб.: СПбГТУРП. -2013.

Бельский А.П., Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учеб. пособие. -СПб.: СПбГТУРП. - 2012.

Готовский М.А. Основы научных исследований теплогидродинамических процессов: учеб. пособие. –СПб.: СПбГТУРП. - 2007.

Бельский А.П. Проектирование и эксплуатация тепломассообменных сушильных установок: учеб. пособие. –Л.: ЛТА. -1992.

Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. -Л.: Химия. -1979.

Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. -М.: Энергия. - 1977.

Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М.: Химия. -1973.

Лыков А.В. Сушка в химической промышленности. -М.: Химия. -1970.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
УСТАНОВКИ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ	4
Пневматические сушильные установки	-
Аэрофонтанные сушильные установки	-
Установка кипящего слоя	7
ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА для исследования гидродинамики и тепломассообмена при сушке дисперсных материалов	9
Лабораторная работа №1. Определение скорости витания и коэффициента формы частиц	14
Описание лабораторной установки	17
Методика проведения работы	-
Обработка опытных данных	-
Пример обработки опытных данных	19
Контрольные вопросы к работе №1	20
Лабораторная работа №2. Изучение гидродинамики взвешенного слоя	21
Описание лабораторной установки	26
Методика проведения работы	-
Обработка опытных данных	27
Пример обработки опытных данных	29
Контрольные вопросы к работе №2	32
Лабораторная работа №3. Испытание цилиндроконической сушилки с взвешенным слоем сыпучего материала	32
Описание лабораторной установки	33
Методика проведения работы	-
Обработка опытных данных	36
Пример обработки опытных данных	38
Контрольные вопросы к работе №3	40
Лабораторная работа №4. Моделирование работы сушильной установки с кипящим слоем и определение основных характеристик циклона	41
Описание лабораторной установки	47
Методика проведения работы	-
Обработка опытных данных	49
Пример обработки опытных данных	51
Контрольные вопросы к работе №4	52
ПРИЛОЖЕНИЯ	54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	56

Учебное издание

Владимир Юрьевич Лакомкин
Сергей Николаевич Смородин
Екатерина Николаевна Громова

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССООБМЕН В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКАХ

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор В.А. Басова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2017 г., поз. 107

Подп. к печати 11.10.17. Формат 60х84/16. Бумага тип. №1.
Печать офсетная. Печ.л. 3,5 . Уч.-изд. л. 3,5.
Тираж 100 экз. Изд. № 107 . Цена “С”. Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.