

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра энергоресурсосберегающих процессов
в химической и нефтегазовой технологиях

Е. Ю. Старикова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЯ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

Методические указания к лабораторной работе № 12 по дисциплине
«Процессы и аппараты химической технологии»
для студентов всех форм обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления
подготовки бакалавров 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие
процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»
в качестве электронного издания для использования в учебном
процессе

Кемерово 2017

Рецензенты:

Михайлов Г. С. – доцент кафедры энергоресурсосберегающих процессов в химической и нефтегазовой технологиях.

Петрик П. Т. – доктор технических наук, профессор, председатель учебно-методической комиссии направления подготовки 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Старикова Елена Юрьевна

Экспериментальное определение основных характеристик слоя зернистого материал [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе № 12 по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» для студентов направлений подготовки бакалавров 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и 18.03.01 «Химическая технология» всех форм обучения / Е. Ю. Старикова; КузГТУ. – Электрон. дан. – Кемерово, 2017. – Систем. требования: Pentium III; ОЗУ 8 Мб; Windows 07; мышь. – Загл. с экрана.

Содержат теоретические положения, методику выполнения работы и контрольные вопросы. Приведен список литературы.

© КузГТУ, 2017

© Старикова Е. Ю., 2017

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель настоящей работы – экспериментальное определение основных характеристик слоя зернистого материала и сравнение полученных величин со справочными данными.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Слой зернистого материала образуется путем засыпки его в заданный объем газа или жидкости (рис. 1, *а*). Зернистый материал представляет собой скопление частиц или зерен правильной шаровой (рис. 1, *б*) или неправильной (рис. 1, *в*) формы, засыпанных в заданный объем (рис. 1, *а*).

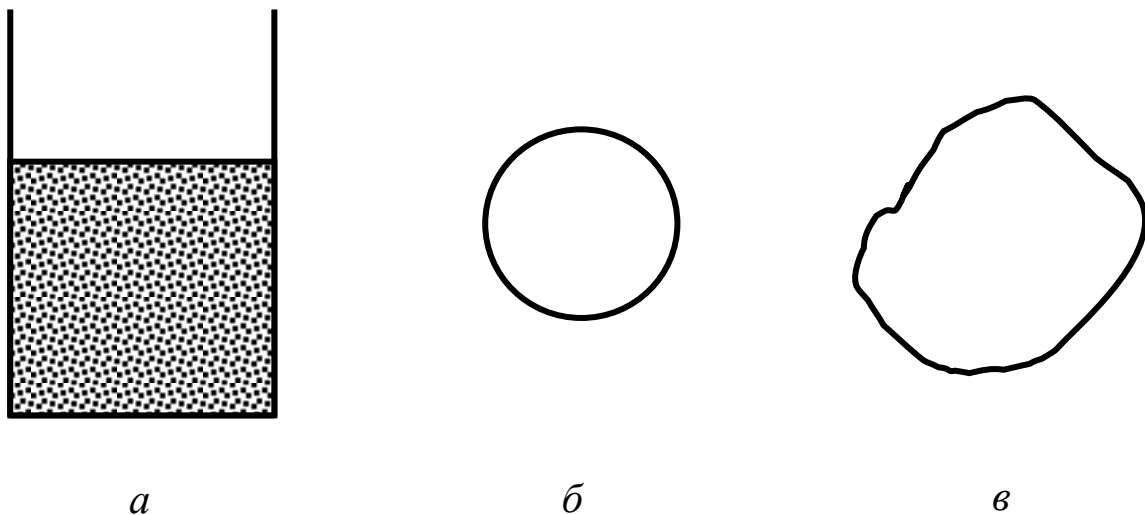


Рис. 1. Слой зернистого материала

В качестве зернистого материала могут применяться зерна злаков или песок, галька, щебень и пр. Частицы, образующие зернистый слой, могут иметь неодинаковые размеры. Укладка частиц при их засыпке может быть разной в зависимости от случайного расположения частиц в слое. Между частицами в слое остаются просветы, сложной формы каналы, объемчики, заполненные газом или жидкостью. Слой зернистого материала представляет собой сложную многофазную неоднородную термодинамическую систему, свойства которой должны описываться свойствами частиц, их геометрическими размерами и формой и расположением их в пространстве.

В слое находится достаточно большое количество частиц. Определение геометрических размеров каждой частицы, их формы и координат в объеме слоя практически невозможно.

Для большого скопления частиц могут быть использованы статистические закономерности, определяющие средние величины, характеризующие слой. Эти характеристики слоя носят вероятностный характер.

Основные характеристики зернистого слоя:

– **насыпная плотность** зернистого материала ρ_n (кг/м³) – масса единицы объема зернистого слоя; для экспериментального определения этой величины берут навеску зернистого материала и определяют ее объем, делением массы навески на объем находят ρ_n (см. табл. 1);

– **порозность слоя** ε выражает долю свободного объема, занятого слоем, если V – общий объем, занимаемый зернистым слоем, V_0 – объем собственно частиц, то

$$\varepsilon = \frac{V - V_0}{V_0} = 1 - \frac{V_0}{V} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_T}, \quad (1)$$

где ρ_T – плотность материала зерен слоя, кг/м³;

Величина ε зависит от формы элементов, состояния их поверхности, характера их упаковки в слое, на который в свою очередь влияют свойства материала элементов слоя; в зависимости от укладки порозность слоя из упорядоченно расположенных шаров может изменяться в широких пределах: от $\varepsilon = 0,476$ при максимально рыхлой структуре до $\varepsilon = 0,295$ при максимально плотной структуре (табл. 2); порозность наиболее вероятной нерегулярной укладки шаров имеет величину $0,38 \div 0,39$;

– **удельная поверхность** зернистого слоя a (м²/м³) – это суммарная поверхность зерен слоя в единице его объема; эта величина зависит от размеров и формы элементов слоя и от величины порозности ε слоя (табл. 3);

– **фактор формы** Φ вводят для количественной характеристики отклонения формы зерна от сферической, он равен отношению поверхности шара $F_{ш}$, имеющего тот же объем, что и рассматриваемое тело, к поверхности тела F , $\Phi = \frac{F_{ш}}{F}$; для шара

фактор формы Φ , естественно, равен 1, а для несферических тел с развитой поверхностью $\Phi < 1$, т.к. шар имеет минимальную поверхность при данном объеме;

– **расчетный диаметр** частицы вычисляют из соотношения

$$d = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}},$$

где x_i – объемная или, при одинаковой плотности, массовая доля частиц с диаметром d_i ; n_i – количество частиц, если зернистый слой состоит из частиц неправильной, но близкой к шарообразной формы, и имеющих различные размеры, т.е. слой полидисперсный.

Многие авторы рассматривают движение газов и жидкостей через слой твердых частиц зернистого сыпучего материала как внутреннюю задачу (движение в каналах между частицами), другие – как внешнюю (внешнее обтекание частиц). Есть исследования, в которых движение жидкости (газа) через слой рассматривается на фоне периодического сужения и расширения струй потока при проходе через участки сечения, где имеется наибольшее сближение частиц. Несмотря на то, что основные положения этих методов различны, они дополняют друг друга, и расчетные зависимости, выведенные на их основе, дают результаты, очень близкие между собой.

При анализе гидродинамики зернистого слоя остановимся на первом методе (внутренняя задача). В этом методе используется известное уравнение Дарси-Вейсбаха для расчета сопротивления среды при движении сквозь нее газового потока:

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d_{\text{э}}} \frac{\rho w^2}{2}, \quad (2)$$

где ΔP – сопротивление среды, Па; ρ – плотность газа, кг/м³; λ – коэффициент сопротивления; H – высота зернистого слоя, м; w – действительная скорость газа в каналах слоя, м/с.

$$w = \frac{w_0}{\varepsilon}, \quad (3)$$

$$w_0 = \frac{V_B}{F_c}, \quad (4)$$

где w_0 – фиктивная скорость газа, м/с; V_B – объемный расход воздуха через слой, м³/с; F_c – площадь поперечного сечения канала, м²; $d_{\text{э}}$ –

эквивалентный диаметр каналов в зернистом слое, м, соответствующий суммарному поперечному сечению каналов, который определяется делением учетверенной доли свободного объема на его удельную поверхность

$$d_{\text{э}} = \frac{4\varepsilon}{a}. \quad (5)$$

Эквивалентный диаметр $d_{\text{э}}$ может быть выражен также через размер частиц, составляющих слой:

$$d_{\text{э}} = \frac{2\Phi \varepsilon d}{3(1-\varepsilon)}. \quad (6)$$

Объединяя формулы (2), (3) и (6), получаем

$$\Delta P = \frac{3(1-\varepsilon)}{2\varepsilon^3\Phi} \lambda \frac{H}{d} \rho \frac{w_0^2}{2}. \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления λ зависит от гидродинамического режима, определяемого величиной критерия Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w d_{\text{э}} \rho}{\mu}, \quad (8)$$

где μ – вязкость газа (жидкости), Па·с.

Подставляя в уравнение (8) выражения (6) и (3), получим

$$\text{Re} = \frac{2}{3} \frac{\Phi}{(1-\varepsilon)} \frac{w_0 d \rho}{\mu}. \quad (9)$$

Предложен ряд зависимостей для расчета коэффициента сопротивления λ при различных режимах движения газа (жидкости) через слой. Все эти уравнения получены обобщением опытных данных различных исследователей.

При ламинарном движении газа (жидкости) через неподвижный зернистый слой ($\text{Re} \leq 2$)

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}.$$

Для всех режимов движения применимо обобщенное уравнение

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34. \quad (10)$$

Уравнение (10) применимо для зернистых слоев с относительно равномерным распределением пустот (слои шаров, гранул, зерен, частиц неправильной формы).

При $Re > 7000$ наступает автомодельная область турбулентного режима движения в зернистом слое, когда можно пренебречь первым членом в правой части уравнения (10). В этом случае $\lambda \approx 2,34 = \text{const}$.

На практике используют универсальную полуэмпирическую формулу Эргана для определения сопротивления зернистого слоя в неограниченном интервале значений Re

$$\Delta P = \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu w}{d_{\text{з}}^2} + 1,75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho w^2}{d_{\text{з}}} \right] H. \quad (11)$$

Первое слагаемое отражает здесь влияние вязкостных сил (ламинарная составляющая), второе – инерционных (турбулентная составляющая).

Для числа Re приняты (это обусловлено обычной точностью инженерных расчетов) следующие граничные значения критерия Рейнольдса: при $Re < 2$ течение считается *ламинарным*, при $Re \geq 1000$ – *турбулентным*. В диапазоне $2 < Re < 1000$, когда силы вязкости и инерции сопоставимы, течение считают *переходным*. При этом переход от ламинарного режима к турбулентному, согласно (11), происходит плавно: с ростом Re постепенно повышается вклад второго слагаемого в сравнении с первым.

При ламинарном движении потока газа или жидкости через зернистый слой уравнение (11) упрощается:

$$\Delta P = \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu w}{d_{\text{з}}^2} \right] H, \\ \Delta P = \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\Phi^2 \varepsilon^3} \frac{\mu w_0}{d^2} \right] H. \quad (12)$$

Экспериментальное определение фактора формы Φ часто проводят путем измерения гидравлического сопротивления слоя, состоящего из частиц данного материала соответствующего размера с известной долей свободного объема. Замерив сопротивление слоя $\Delta P_{\text{з}}$ при определенном значении w_0 и фиксированной температуре (а значит и вязкости) газа (жидкости), вычисляют Φ по уравнению (13):

$$\Phi = \sqrt{\frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu H w_0}{\Delta P_{\text{з}} \varepsilon^3 d^2}}, \quad (13)$$

где $\Delta P_{\text{з}}$ – сопротивление слоя, Па.

Уравнение (13) применимо для ламинарного режима, но на данной лабораторной установке при использовании зернистого слоя

из частиц небольших размеров ($\sim 1 \div 2$ мм) режим движения воздуха ламинарный.

Экспериментальное определение удельной поверхности a зернистого слоя проводят аналогично вышеописанному способу определения фактора формы и ведут расчет a по уравнению (14):

$$a = \sqrt{\frac{\Delta P_{\Sigma}}{H} \frac{\varepsilon^3}{w_0 \mu k}}, \quad (14)$$

где k – константа Козени–Кармана (см. табл. 5).

При проведении эксперимента по определению сопротивления, фактора формы и удельной поверхности зернистого материала необходимо соблюдать следующие условия:

1. Величина ε в значительной степени зависит от способа загрузки слоя, поэтому слой необходимо *уплотнять* перед определением ε и ΔP_{Σ} .

2. При засыпке слоя в измерительную ячейку возникает пристеночный эффект: плотность упаковки частиц, прилегающих к стенке аппарата, всегда меньше, а порозность слоя ε_c всегда больше, чем в центральной части аппарата $\varepsilon_{\text{ц}}$ (см. табл. 6). Указанное различие порозности тем значительнее, чем больше соотношение $\frac{d}{D_{\text{в}}}$, где $D_{\text{в}}$ –

внутренний диаметр аппарата. Поэтому необходимо, чтобы соблюдалось соотношение $D_{\text{в}} > 20d$. Большое значение имеет также точный замер внутреннего диаметра аппарата.

3. По аналогии с потоком жидкости в поперечно обтекаемом пучке труб можно считать, что после прохождения пятого ряда зерен характер движения жидкости становится стабильным. Следует учесть, что, по крайней мере, два нижних ряда зерен имеют упорядоченную укладку, так же как и пограничный слой у стенок аппарата. Исходя из этого высоту слоя зерен при определении перепада давления следует выбирать из соотношения $H > 20d$.

4. Для того чтобы скорость газа на входе в слой была достаточно равномерна, обычно устанавливают *выравнивающие приспособления* в виде перегородок.

5. Так как определение удельной поверхности и фактора формы проводят на основе экспериментальных данных о сопротивлении слоя, а удельная поверхность не должна зависеть от величины H и w_0 (при небольших значениях последней), то определения ΔP_{Σ} проводят

при нескольких значениях H и w_o , а вычисленные значения a и Φ усредняют.

3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

На лабораторном стенде опытным путем определяют значения сопротивлений зернистого слоя при различных высотах слоя H и скорости воздуха w_o . Опытные данные сравнивают с теоретическими значениями, рассчитанными по формуле (12).

По формулам (13) и (14) рассчитывают значения фактора формы Φ и удельной поверхности a и сравнивают со справочными данными (табл. 3 и 4).

3.1. Экспериментальное оборудование

Лабораторная установка для изучения основных параметров зернистого слоя состоит из измерительной ячейки 1, в верхней части которой имеется резиновая пробка 2 с патрубком 3 и распределителем воздуха 4, из воздуходувки 5 для подачи воздуха и дифманометра 6 для измерения гидравлического сопротивления слоя зернистого материала (рис. 2).

Измерительная ячейка состоит из стеклянного цилиндра 7 со шкалой для измерения высоты слоя, металлической перфорированной перегородки 8 для поддержания зернистого материала, уплотнительной резиновой прокладки 9 и двух замков 10 для демонтажа измерительной ячейки в случае замены зернистого материала. Для изменения расхода воздуха служит вентиль 11.

Установка работает следующим образом. Из воздуходувки 5 воздух, пройдя вентиль 11 и ротаметр 12, поступает в верхнюю часть измерительной ячейки 1, где равномерно распределяется по сечению цилиндра 7 с помощью распределителя воздуха 4. Пройдя через измерительную ячейку сверху вниз, воздух выходит из нижней открытой ее части, при этом расход воздуха определяется с помощью ротаметра 12 и тарировочной кривой (рис. 3).

3.2. Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к выполнению работы, следует тщательно изучить теоретические положения, устройство лабораторной установки, правила техники безопасности. Перед

началом эксперимента необходимо подготовить журнал наблюдений (табл. 7 и 8).

1. Вынуть из цилиндра измерительной ячейки пробку с распределителем воздуха. Открыть замки и снять верхнюю часть измерительной ячейки.

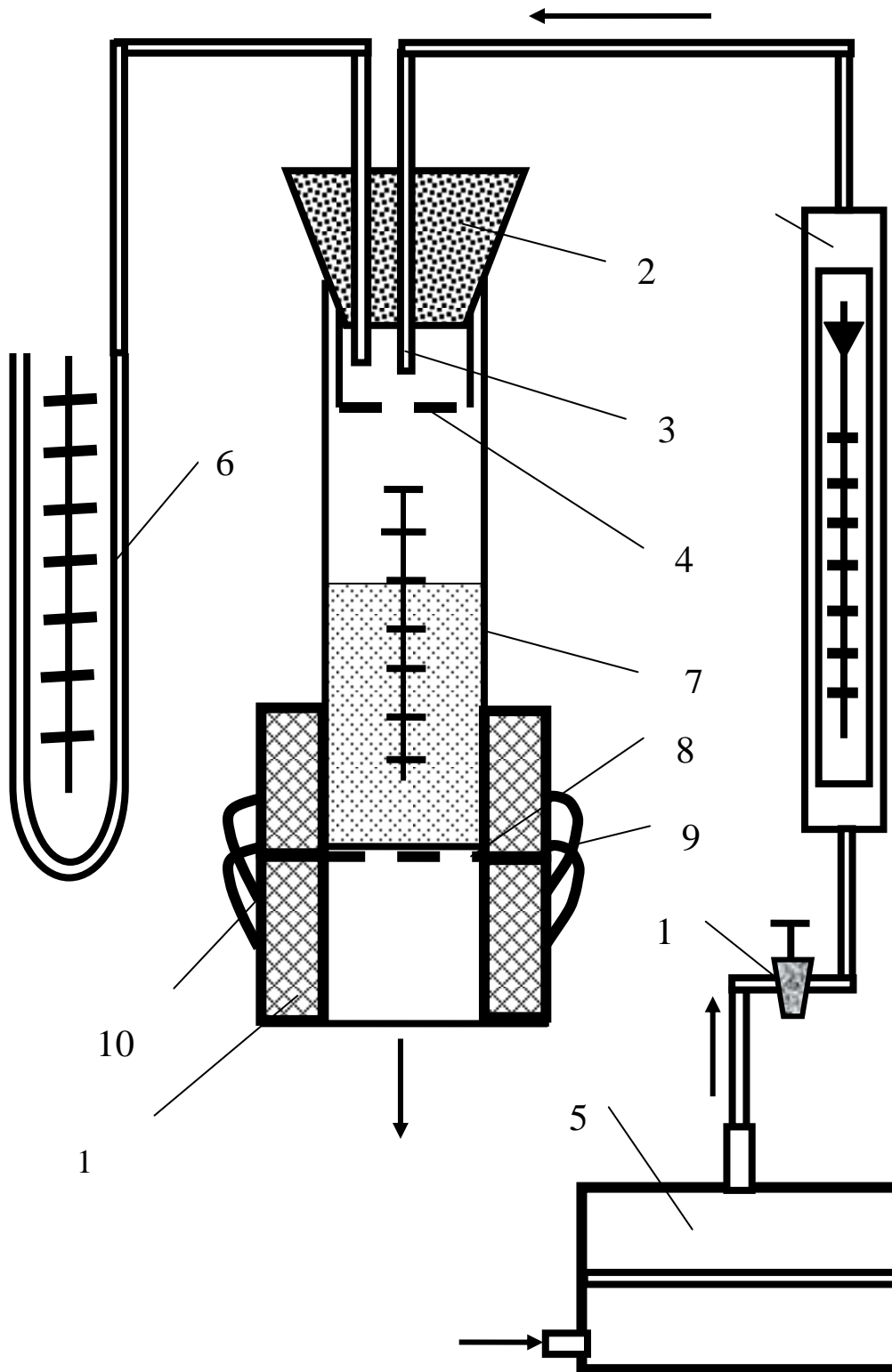


Рис. 2. Схема лабораторной установки:

1 – измерительная ячейка; 2 – пробка; 3 – патрубок; 4 – распределитель воздуха; 5 – воздуходувка; 6 – дифманометр; 7 – стеклянный цилиндр; 8 – перфорированная перегородка; 9 – резиновая прокладка; 10 – замки; 11 – вентиль; 12 – ротаметр

2. Засыпать в цилиндр ячейки какой-либо зернистый материал по указанию преподавателя (из частиц правильной или неправильной формы, средний размер которых известен) на небольшую высоту ($4 \div 6$ см). При засыпке материала ячейку осторожно постукивают о стол для уплотнения частиц в слое. Измерить по шкале на цилиндре высоту слоя, результат занести в табл. 8.

3. Установить на прежнее место верхнюю часть ячейки. Плотнo вставить в цилиндр пробку с распределителем воздуха и патрубками.

4. Включить воздуходувку. Установить вентилем небольшой расход воздуха через ячейку. Увеличивая расход воздуха (до верхнего положения поплавка ротаметра), произвести $5 \div 6$ замеров. Отметить в табл. 8 показания ротаметра и дифманометра в каждом из замеров.

5. Выключить воздуходувку. Вынуть пробку. Снять верхнюю часть ячейки.

6. Увеличить высоту слоя на $1 \div 2$ см и повторить опыт согласно п. 2-5. Произвести опыты с несколькими высотами слоя.

7. Освободить ячейку от материала. Перевернув ее, продуть и прочистить щеткой сетку. Установить на место пустую верхнюю часть ячейки. Провести определение сопротивления перегородки согласно пп. 3-5 при тех же расходах воздуха, которые имели место при определении сопротивления зернистого слоя. Результаты опыта занести в табл. 8.

8. Определение насыпной плотности зернистого материала. Небольшое количество материала ($50 \div 100$ г, масса определяется с помощью аналитических весов) помещают в мерный цилиндр, постукиванием уплотняют слой и определяют объем слоя V . Результаты измерений занести в табл. 7.

9. Провести опыты с другими материалами (по указанию преподавателя).

10. По термометру в лаборатории определить температуру воздуха t , °C. Результат определения занести в табл. 7.

3.3. Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать насыпную плотность зернистого материала по формуле

$$\rho_n = \frac{M}{V}, \quad (15)$$

где M – масса материала, кг; V – объем зернистого слоя, м³.

2. Расчет порозности ε произвести по формуле (1). Результаты расчетов занести в табл. 7.

3. Определить расход воздуха V_B по тарировочной кривой (рис. 3) в каждом из замеров.

4. Рассчитать фиктивные скорости воздуха w_o по формуле (4).

5. При проведении опыта определялось ΔP_Σ – сопротивление слоя вместе с перегородкой. Необходимо определить сопротивление слоя ΔP_Θ без перегородки в каждом из замеров по формуле

$$\Delta P_\Theta = \Delta P_\Sigma - \Delta P_\Pi. \quad (16)$$

6. По формуле (12) рассчитать значения сопротивления слоя ΔP_T для различных значений w_o и H .

7. Построить график зависимости $\Delta P_T = f(w_o)$ при различных значениях H (см. рис. 4), нанести на график $\Delta P_\Theta = f(w_o)$ экспериментальные точки (из табл. 8) с координатами $(w_o; \Delta P_\Theta)$ для различных значений H . Сравнить опытные и теоретические данные.

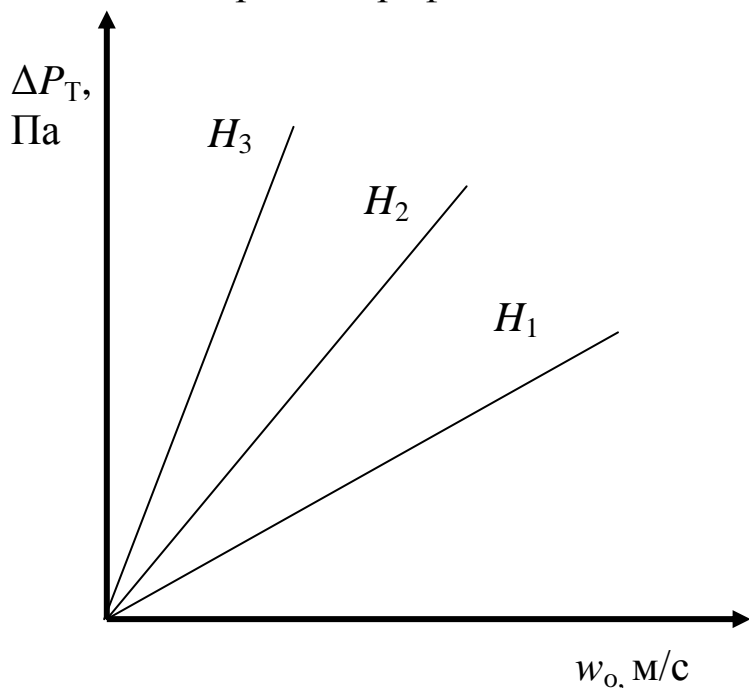


Рис. 4. Зависимость сопротивления слоя от скорости воздуха

8. Рассчитать значения фактора формы Φ и удельной поверхности a для всех значений w_o и H по формулам (13) и (14), приняв значение константы k по табл. 5. Затем определить средние арифметические значения

величин Φ и a и сравнить их со справочными данными (табл. 3 и 4).

9. Сделать выводы по работе.

4. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ

1. Перед работой все студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности.

2. Все виды работ выполняются студентами только по указанию и под руководством преподавателей и лаборантов.

3. При обнаружении неисправности следует немедленно сообщить об этом преподавателю или лаборанту, а при необходимости отключить стенд.

4. ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- а) оставлять без присмотра находящийся в работе стенд;
- б) производить исправления в электросхеме;
- в) производить работы на оборудовании, не относящемся к данной работе.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 (297×210 мм) и должен содержать:

- титульный лист установленного образца;
- кратко изложенные теоретические положения;
- принципиальную схему лабораторной установки;
- таблицы измеренных и рассчитанных величин;
- графики зависимости $\Delta P_T = f(w_o)$ с нанесенными на них опытными точками;
- анализ результатов и выводы по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель работы.
2. Что называется насыпной плотностью, порозностью и удельной поверхностью зернистого материала?
3. Каковы экспериментальные способы определения насыпной плотности, порозности и удельной поверхности зернистого слоя?
4. Как на лабораторной установке измеряют расход воздуха и сопротивление зернистого слоя?
5. Что называется фактором формы частиц зернистого слоя? Каковы значения этой величины для различных частиц?
6. Экспериментальное определение фактора формы.
7. Какие существуют режимы течения жидкости (газа) через зернистый слой? Как определить режим течения жидкости (газа) через зернистый слой? Каковы критические значения чисел Рейнольдса?

8. Каковы условия, необходимые для корректного проведения эксперимента по определению основных параметров зернистого слоя?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Альянс, 2005. – 750 с.

2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1 / под ред. В. Г. Айнштейна. – М.: Высш. шк., 2002. – 887 с.

3. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

4. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.

5. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – М.: Альянс, 2005. – 576 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Насыпная плотность некоторых зернистых материалов [5]

Материал	Плотность ρ_T , кг/м ³	Насыпная плотность ρ_H , кг/м ³
Апатит	3190	1850
Гипс кристаллический	2240	1300
Зола	2200	680
Земля сухая	1800	1300
Известняк	2650	1800
Кварц	2650	1500
Кокс	1300	500
Колчедан серный	5000	3300
Песок сухой	1500	1200
Селитра натриевая	2260	1200
Сода кристаллическая	1450	800
Соль каменная	2350	1020
Уголь древесный	1450	200
Уголь каменный	1350	800

Таблица 2

Средняя порозность слоя шаров одинакового размера [4]

Материал шаров	d , мм	ε
Стекло	0,8	0,37÷0,42
Стекло	1,1	0,41÷0,48
Стекло	3,2÷3,65	0,395
Стекло	6,5	0,394
Свинец	2,0÷2,1	0,39÷0,40
Сталь	3,18; 3,95	0,39÷0,41

Таблица 3

Удельная поверхность зернистого слоя для сферических частиц

Размер частиц d , мм	Порозность слоя ε [4]	Удельная поверхность a , $\text{м}^2/\text{м}^3$ [4]
1	2	3
0,028	0,38÷0,39	304500
0127	0,38÷0,39	47700
0,279	0,38÷0,39	20800
0,8	0,37	6000
0,8	0,38	5900
0,8	0,39	5750
0,8	0,4	5600
0,8	0,41	5500
0,8	0,42	5400
1,1	0,38	5000
1,1	0,39	4800
1,1	0,40	4600
1,1	0,41	4400

Таблица 4

Значения фактора формы для различных зернистых слоев [4]

Материал	d , мм	ε	Φ
Песок морской	1,5	0,35	0,76
Песок речной	1,2÷2,5	0,39	0,76
Песок горный	1,6÷2,4	0,39	0,74
Активированный уголь	1÷2	0,5	0,64
Антрацит	1,0	0,54	0,66
Глинозем	1÷3	0,5	0,68
Силикагель	3÷5	0,49	0,50
Алюмосиликагель	2,5	0,52	0,556

Таблица 5

Значения констант k в уравнении (14)
для монодисперсного слоя шаров

Материал	d , мм	ε	k
Металл	0,15÷0,4	0,38÷0,43	5,7÷7,0
Металл	0,5÷0,8	0,35÷0,375	3,9
Металл	2,5÷7,15	0,39	4,52
Сталь	1,65	0,446	5,4
Стекло	0,255 и более	0,35÷0,45	4,5÷5,1
Силикагель	0,15÷0,4	0,36÷0,49	5,6
Зерна пшена	-	0,32÷0,42	4,5

Таблица 6

Порозность зернистого слоя в центре и вблизи стенки аппарата

Характеристика элементов слоя	Порозность в ядре слоя $\varepsilon_{\text{ц}}$ [4]	Порозность у стенки $\varepsilon_{\text{с}}$ [4]
Шары металлические полированные	0,8	0,45
Шары пробковые	0,37	0,53
Цилиндры деревянные	0,26	0,41
Гранулы расплавленного корунда	0,37	0,5
Гранулы расплавленного магнетита	0,4	0,5

Таблица 7

Журнал наблюдений №1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Материал	Размер частиц d , м	Истинная плотность ρ_T , кг/м^3	Навеска материала M , кг	Объем слоя V , м^3	Насыпная плотность ρ_H , кг/м^3	Порозность слоя ε	Температура воздуха t , °C	Вязкость воздуха μ , Па·с

Таблица 8

Журнал наблюдений № 2

1	Размер частиц d , м
2	Высота слоя H , м
3	Подъем поплавка ротаметра, дел.
4	Объемный расход воздуха, V_B , $\text{м}^3/\text{с}$
5	Скорость воздуха w_0 , м/с
6	Сопротивление перегородки ΔP_{Π} , мм вод. ст.
7	Сопротивление слоя и перегородки ΔP_{Σ} , мм вод. ст.
9	Сопротивление слоя ΔP_{Σ} , мм вод. ст. (ф. 16)
10	Сопротивление слоя ΔP_{Σ} , Па
11	Сопротивление слоя, рассчитанное по форм. (12) ΔP_T , Па
12	Фактор формы F
13	Удельная поверхность a , $\text{м}^2/\text{м}^3$

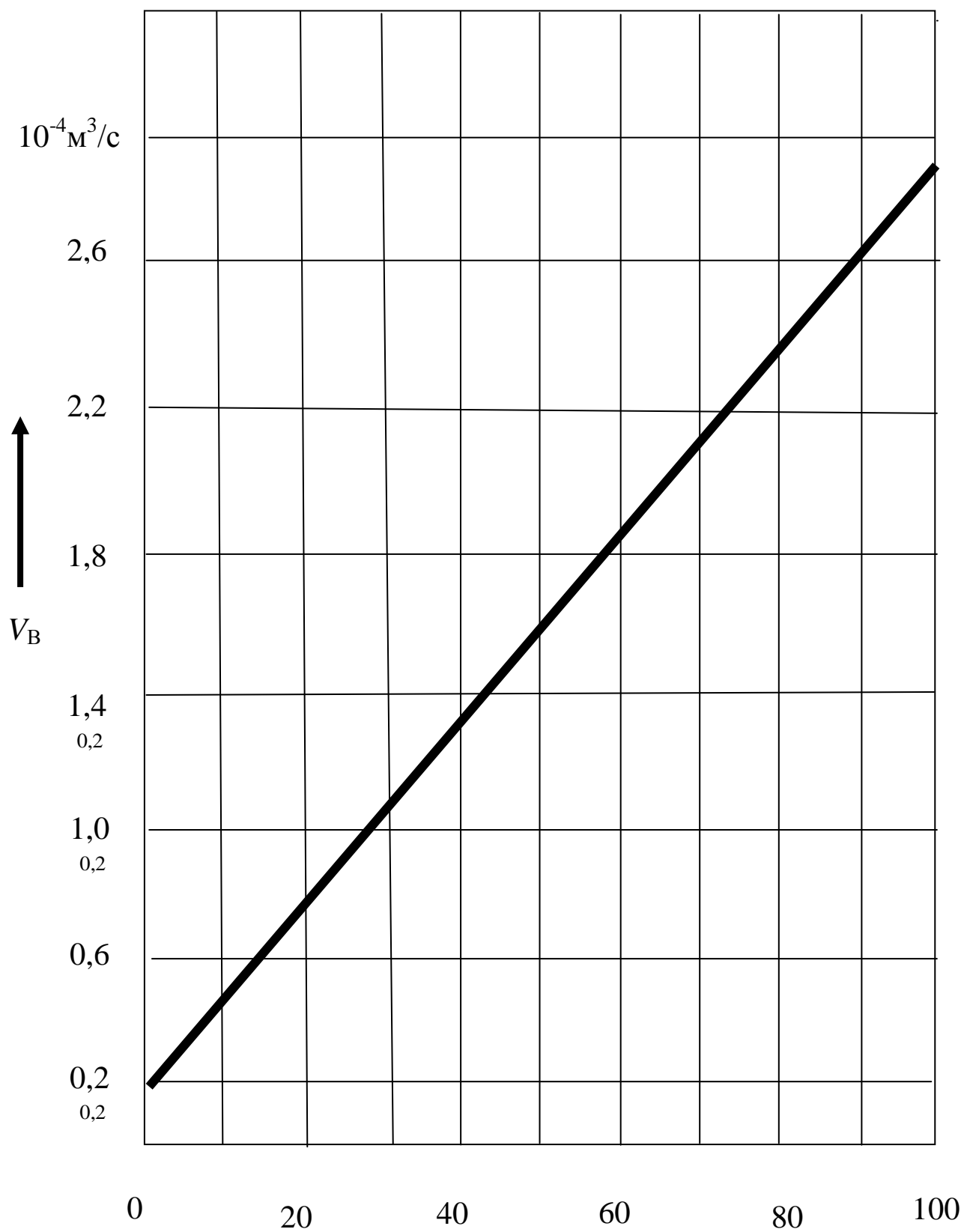


Рис. 3. Тарировочная кривая ротаметра-расходомера