

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Астраханский государственный технический университет
Институт нефти и газа**

Кафедра «Химическая технология переработки нефти и газа»

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

Лабораторный практикум
для студентов очной и очно-заочной форм обучения
направления 18.04.01 «Химическая технология»

Астрахань 2021

Разработчики: к.т.н., доцент Власова Г.В.,
к.т.н. Козырев О.Н.

Рецензент – доцент кафедры «Химическая технология переработки нефти и газа», к.т.н., доц. Савенкова И.В.

Лабораторный практикум для проведения работ по разделу «Гидромеханические процессы» дисциплины «Процессы и оборудование нефтегазоперерабатывающих производств» по направлению 18.04.01 «Химическая технология, Астрахань: АГТУ, 2021, 40 с.

Предлагаемый лабораторный практикум предназначен для проведения лабораторных работ студентов очной и очно-заочной форм обучения направления 18.04.01 «Химическая технология» и содержит требования безопасного проведения работ, теоретическую часть, руководство к выполнению лабораторных работ по изучению гидромеханических процессов, а также контрольные вопросы и список литературных источников.

Лабораторный практикум рассмотрен и рекомендован к внутривузовскому изданию на заседании кафедры «Химическая технология переработки нефти и газа» (протокол № 6 от 21.06.2021)

© Астраханский государственный технический университет

Содержание

1 Меры безопасности при выполнении лабораторных работ	4
2 Теоретические основы процесса	6
2.1 Отстаивание	7
2.2 Фильтрация	12
2.3 Центрифугирование	16
2.4 Перемешивание и диспергирование	19
2.5 Псевдооживленный (кипящий) слой	20
3 Методики проведения работ	22
3.1 Лабораторная работа №1 «Изучение кинетики процесса осаждения»	22
3.2 Лабораторная работа №2 «Определение констант процессов фильтрации»	26
3.3 Лабораторная работа №3 «Разделение гетерогенных систем в поле центробежных сил»	31
3.4 Лабораторная работа №4 «Изучение процесса псевдооживления»	34
Используемая литература	38
Приложение	39

1 Меры безопасности при выполнении лабораторных работ

К проведению лабораторных работ студенты допускаются только после прохождения первичного инструктажа по технике безопасности.

Для выполнения лабораторной работы студент должен:

- использовать спецодежду (халат хлопчатобумажный, который следует носить в застегнутом виде);
- не загромождать проходы, лабораторные столы и стулья рюкзаками, портфелями, сумками и т.п.
- перед началом работы включить систему вентиляции;
- осмотреть электрические розетки и вилки, электрические провода и блоки питания на электроприборах и т.п., используемые при выполнении данной работы на предмет целостности;
- изучить методические рекомендации по выполняемой работе;
- перед использованием стеклянной посуды проверить ее путем наружного осмотра на наличие царапин, трещин, сколов;
- для разогрева вязких нефтепродуктов использовать водяную баню;
- во избежание ожогов осторожно переносить и переливать разогретые нефтепродукты;
- во избежание порезов аккуратно обращаться с химической посудой;
- при розливе небольшого количества нефтепродукта использовать ветошь, при больших разливах – песок;

- после завершения анализа утилизировать нефтепродукты и смеси в соответствии с установленными требованиями;

- привести в порядок свое рабочее место (вымыть за собой использованную химическую посуду и части прибора, выключить приборы из сети).

Отчет по каждой лабораторной работе должен включать следующие разделы:

- цель лабораторной работы;
- порядок выполнения лабораторной работы;
- результаты измерений в виде таблиц и графиков;
- обсуждение результатов, выводы

Титульный лист отчета оформляется согласно Приложению.

2 Теоретические основы процесса

Неоднородными являются системы, состоящие не менее чем из двух фаз, не обладающих химическим сродством. Одна фаза является сплошной средой для другой фазы. Сплошная фаза — внешняя среда (или дисперсная среда), а внутренняя — рассредоточенная, распределенная дисперсная фаза.

Примеры неоднородных систем:

- суспензия — состоит из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц;
- эмульсия — состоит из жидкости и распределенных в ней капель другой жидкости, нерастворимой впервой;
- пена — состоит из жидкости и распределенных в ней пузырьков газа;
- туман — состоит из газа и взвешенных в нем капель жидкости;
- пыль — состоит из газа и распределенных в нем твердых частиц размерами 5-50 мкм (эта система образуется при дроблении и транспортировке твердых материалов)
- дым — система, состоящая из газа и распределенных в нем твердых частиц размерами 0,3-5 мкм.

Методы разделения жидких гетерогенных систем:

- отстаивание;
- фильтрование;
- центрифугирование;
- перемешивание;
- диспергирование.

2.1 Отстаивание

Для разделения суспензий, содержащих сравнительно крупные частицы (часто — сотые доли миллиметра), в случае невысокой вязкости жидкости и не очень малой разности плотностей твердых частиц и жидкости применяется **естественное осаждение** — процесс осуществляется *в поле сил тяжести* под действием движущей силы, базирующейся на разности удельных сил тяжести и выталкивающей (архимедовой). Дело в том, что такая система характеризуется большими значениями критерия Архимеда.

Сущность процесса естественного осаждения ясна из рисунка 1. Примем для простоты, что исходная суспензия (I) содержит твердые частицы одинакового размера. Первоначально (ситуация *A*) суспензия заполняет вертикальный сосуд. Спустя некоторый промежуток времени (ситуация *B*) в результате осаждения твердых частиц в сосуде образуются (рассматривается наиболее часто встречающийся случай $\rho_t > \rho$) слой осветленной жидкости (II) и осадок (III), между которыми расположена зона (I) еще не разделившейся суспензии.

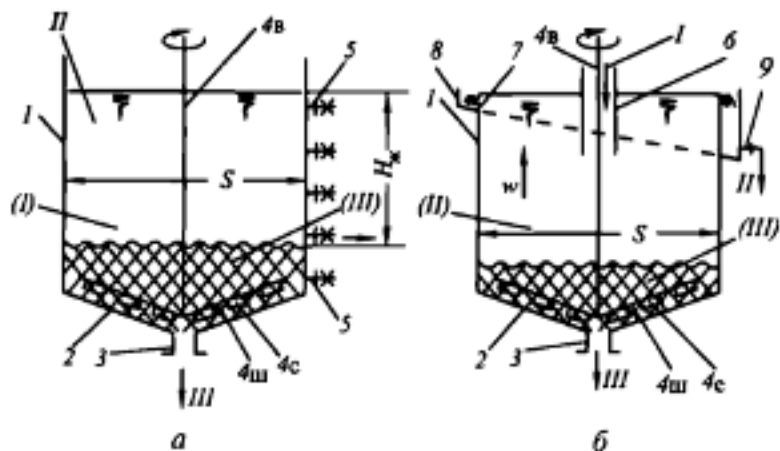


Рисунок 1 — Простейшие отстойники

а — вертикальный отстойник периодического действия, б — вертикальный отстойник непрерывного действия

1 — цилиндрический корпус отстойника, 2 — коническое днище, 3 — патрубок для отвода осадка, 4 — транспортирующее устройство (в, с, ш — ось вала, скребки, штанга), 5 — патрубок для отвода осветленной жидкости, 6 — патрубок для подачи исходной суспензии, 7 — круговой порог, 8 — кольцевой карман, 9 — штуцер для отвода осветленной жидкости, 10 — прямоугольный корпус отстойника;

I — исходная суспензия, II — осветленная жидкость, III — осадок, быстрее оседающие крупные частицы.

Рассмотрим процесс осаждения твердой частицы произвольной формы плотностью ρ_t в жидкости плотностью $\rho_{ж}$. Характерным размером частицы может быть, например l , наибольший габаритный размер, ее диаметр и т.д.

Если $\rho_t > \rho_{ж}$, частица будет осаждаться, если $\rho_t < \rho_{ж}$ частица будет всплывать, если $\rho_t = \rho_{ж}$ — плавать (например на поверхности).

Рассмотрим силы, действующие на частицу округлой формы, погруженную в жидкость. В этом случае на частицу действуют: сила тяжести G_T , подъемная сила G_n и силы трения $G_{тр}$. Объем частицы пропорционален характерному размеру в третьей степени и коэффициенту C_1 , учитывающему форму частицы (для частицы сферической формы $C_1=1$).

Сила тяжести:

$$G_T = C_1 \times l^3 \times \rho_T g \quad (1)$$

где $g=9,81$ – пересчетный коэффициент плотности в удельный вес.

Подъемная сила:

$$G_n = C_2 \times l^3 \times \rho_{ж} g \quad (2)$$

при этом $C_1 = C_2$ для сферической поверхности.

Под действием разности этих сил частица перемещается в жидкости, при этом на единицу поверхности частицы со стороны жидкости действует силы трения, определяемые по закону Ньютона-Петрова:

$$G_{тр} = \mu \frac{dW}{dn} \quad (3)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости жидкости, $H \times c / m^2$;

$\frac{dW}{dn}$ - градиент скорости движения жидкости, l/c .

Сумма сил трения, действующих на частицу, зависит от величины поверхности частицы $c_2 l^2$. Суммарная сила трения:

$$G_{тр} = c_2 \times l^2 \times \mu \frac{dW}{dn} \quad (4)$$

На основании второго закона механики равнодействующая всех сил, действующих на частицу, равна инерционной силе G_n :

$$G_T - G_n - G_{тр} = G_n \quad (5)$$

После некоторых преобразований в развернутом виде уравнение (5) записывается так:

$$C_1 l^3 (\rho_t - \rho_{ж}) - C_2 l^2 r \frac{dW}{dn} = C_1 l^2 \rho_t \frac{dW}{dr} \quad (6)$$

где r – радиус сферической частицы.

Уравнение (6) представляет собой **дифференциальное уравнение процесса осаждения** под действием сил тяжести, которое не может быть решено в общем виде обычным математическим способом, поскольку количество неизвестных превышает число уравнений. Поэтому уравнение приобретает вид:

$$Re = a(\psi Ar)^n \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой критериальное уравнение процесса осаждения в общем виде:

где a – коэффициент;

$\psi = \frac{C_2}{C_1}$ – коэффициент формы частицы;

Ar – критерий Архимеда;

n – показатель степени.

Числовые значения коэффициента « a » и показателя степени « n » получают экспериментальным путем.

Скорость осаждения W_0 частиц нешарообразной формы меньше, чем скорость осаждения шарообразных частиц. Чтобы ее рассчитать, значение скорости осаждения W_0 для шарообразных частиц необходимо умножить на поправочный коэффициент ψ .

Коэффициент $\psi < 1$, и его значения определяют опытным путем. Так для частиц сферической формы $\psi = 1$, для округлой $\psi \approx 0,77$, для угловатых $\psi \approx 0,66$, для продолговатых $\psi \approx 0,58$ и для пластинчатых $\psi \approx 0,43$.

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \times l \times \rho}{\mu} = \frac{w \times l}{\nu} \quad (8)$$

где μ и ν – динамическая и кинематическая вязкости среды.

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{l^3}{\nu^2} \times \frac{\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \quad (9)$$

Физический смысл критерия Re это соотношение сил инерции и сил трения. Критерий характеризует гидродинамику потока.

Физический смысл критерия Ar можно объяснить как отношение разности сил тяжести и подъемной силы к подъемной силе.

Практически можно обеспечить три режима движения оседающей частицы: ламинарный, переходный и турбулентный. Ламинарный режим при $Re < 1,85$, при $1,85 < Re < 500$ - переходный и при $Re > 500$ - турбулентный.

Для каждого режима найдены из опытов расчетная зависимость вида:

$$\text{при } Re < 1,85 \quad Re = \frac{1}{18} \psi \times Ar \quad (10)$$

$$\text{при } 1,85 < Re < 500 \quad Re = 0,152(\psi \times Ar)^{0,715} \quad (11)$$

$$\text{при } Re > 500 \quad Re = 1,74(\psi \times Ar)^{0,5} \quad (12)$$

По найденному при помощи уравнений (10-12) числовому значению критерия Re определяется скорость осаждения взвешенной частицы в жидкости или газе под действием силы тяжести.

$$w_0 = \frac{Re \times \nu}{l} = \frac{Re \times \mu}{l \times \rho} \quad (13)$$

Осадительные аппараты (отстойники) могут работать периодически или непрерывно, причем непрерывные отстойники могут быть вертикальными и горизонтальными.

2.2 Фильтрация

Фильтрация обеспечивает разделение суспензий, пыли и туманов с помощью пористой (фильтровальной) перегородки, способной пропускать жидкость или газ и задерживать взвешенные в них твердые частицы.

Для инженерных расчетов фильтровальной аппаратуры необходимо знать так называемые константы фильтрации, характеризующие гидравлическое сопротивление осадка и фильтрующей перегородки.

Скорость фильтрации суспензий (взвесей) существенным образом зависит от физических свойств и крупности твердых частиц.

По степени крупности твердых частиц, суспензии делят на:

- грубые (размер частиц более 100 мкм);
- тонкие (размер частиц от 100 до 0,5 мкм);
- мути (жидкости с размерами твердых частиц до 0,5 мкм);
- коллоидные растворы (размер твердых частиц от 100 мкм).

На практике встречаются все виды суспензий, большей частью с разными размерами частиц, то есть полидисперсные системы.

При фильтрации суспензия поступает на пористую фильтрующую перегородку, через которую жидкая фаза проходит, а взвешенные частицы остаются на поверхности фильтра в осадке.

Хорошая работа фильтра во многом зависит от свойств фильтрующей перегородки. Фильтрующие перегородки изготавливаются из различных хлопчатобумажных тканей (бельтинг, бязь, миткаль, диагональ и др.), шерстяных тканей (сукно, байка, войлок), тканей из синтетических волокон (поливинилхлоридные, перхлорвиниловые, полиамидные, виньон, саран, орлон, лавсан и др.), тканей из волокон минерального происхождения (асбестовые, стеклянные) и др. В последнее время все шире начинают применять пористые металлические, керамические и металлкерамические фильтрующие перегородки.

Выбор той или иной фильтрующей перегородки обусловлен:

1. пористостью (размер пор должен быть таким, чтобы частицы осадка задерживалась на перегородке);
2. химической стойкостью к действию фильтрующей среды;
3. достаточной механической прочностью;
4. теплостойкостью при температуре фильтрования.

Рассматривая параметры, влияющие на процесс фильтрования, можно написать в самом общем виде закон фильтрования:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{R} \quad (14)$$

где dV - производительность по фильтрату за время $d\tau$;

$dV/d\tau$ – скорость фильтрования;

Δp – движущая сила процесса фильтрования (перепад давлений);

R – сопротивление процесса фильтрования.

Движущей силой процесса фильтрования служит разность давлений по обе стороны фильтрующей перегородки. Разность давления может быть создана:

1. слоем самой суспензии, налитой на фильтр;
2. подачей суспензий на фильтр под давлением;
3. создание вакуума под фильтрующей перегородкой.

Сопротивление фильтрования складывается из сопротивления осадка R_{oc} и сопротивления фильтрующей перегородки (ткани) R_{mk} , т.е.:

$$R = R_{oc} + R_{mk} \quad (15)$$

Так как сопротивление осадка пропорционально количеству отложившегося осадка, а, следовательно, пропорционально количеству прошедшего фильтрата, то:

$$R_{oc} = K'V \quad (16)$$

где K' – коэффициент пропорциональности.

Сопротивление фильтрующей перегородки можно заменить сопротивлением слоя осадка, оказывающего такое же сопротивление процессу фильтрования, какое оказывает ткань, и выразить соответствующим количеством фильтрата C :

$$R_{mk} = K'C \quad (17)$$

Тогда:

$$R = K'(V + C) \quad (18)$$

С помощью некоторых преобразований получим:

$$V^2 + 2VC = K\tau \quad (19)$$

где $K = \frac{2\Delta p}{K'} = \frac{2\Delta p}{\mu_0 x_0}$,

μ - вязкость фильтрата;

μ_0 - удельное сопротивление осадка;

x_0 - концентрация суспензии.

Размерность V можно выразить в $\text{м}^3/\text{м}^2$ или $\text{л}/\text{м}^2$, C – в $\text{м}^3/\text{м}^2$ или $\text{л}/\text{м}^2$, K – в $\frac{\text{м}^6}{\text{м}^4 \cdot \text{мин}}$ и τ – в мин.

Если известны константы K и C уравнения (19), то можно определить необходимую поверхность фильтрования при заданной производительности фильтра, что особенно важно при проектировании фильтровальной аппаратуры. Эти константы определяют опытным путем

Получим следующее уравнение:

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2}{K}V + \frac{2C}{K}; \quad \frac{\Delta\tau}{\Delta V} = \frac{2}{K}V + \frac{2C}{K} = AV + B \quad (20)$$

В уравнении (20) $\Delta\tau$ и ΔV представляют собой приращения времени фильтрования и объема полученного фильтрата. В координатах $V - \Delta\tau/\Delta V$ это уравнение изображается прямой линией ДМ, наклоненной к оси абсцисс под углом α , тангенс которого $\text{tg} = 2/K$. Эта линия отсекает на оси ординат (при $V=0$) отрезок $B=2C/K$.

Для определения постоянных процесса фильтрования K и C проводят опыт по разделению исследуемой суспензии на фильтре при постоянной разности давлений.

Объемная скорость прохода жидкости через фильтр, или скорость фильтрования (в $\text{м}^3/\text{м}^2$ или $\text{л}/\text{м}^2$) — величина переменная, непрерывно уменьшающаяся, которую для заданного момента времени от начала фильтрования определяют по уравнению (20а) как:

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{K}{2(V+C)} \quad (20a)$$

2.3 Центрифугирование

Под центрифугированием понимают процесс разделения неоднородных систем в поле центробежных сил с использованием сплошных или проницаемых для жидкости перегородок. Процессы центрифугирования проводятся в машинах, называемых центрифугами. Центрифуга представляет собой в простейшем виде вертикальный цилиндрический ротор со сплошными или перфорированными боковыми стенками. Ротор укрепляется на вертикальном валу, который приводится во вращение электродвигателем, и помещается в соосный цилиндрический неподвижный кожух, закрываемый съемной крышкой; на внутренней поверхности ротора с перфорированными стенками находится фильтровальная ткань или тонкая металлическая сетка.

Создание центрифуг обусловлено стремлением повысить скорость разделения неоднородных систем в поле центробежных сил по сравнению со скоростью разделения этих систем в отстойниках или фильтрах. Поэтому целесообразно оценить в общем виде отношение центробежной силы к силе тяжести. Это можно сделать сравнением ускорений, действующих на тело в центробежном и гравитационном полях, так как применительно к телу определенной массы силы пропорциональны ускорениям.

Разделяющее действие центрифуг возрастает пропорционально величине центробежного фактора разделения, который представляет собой отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести:

$$K_p = \frac{W^2 \cdot r}{g} \quad (21)$$

где W – угловая скорость вращения, выраженная в радианах в секунду.

Если мы числитель и знаменатель этой дроби умножим на массу вращаемого тела, то в числителе мы получим центробежную силу, а в знаменателе силу тяжести. Следовательно, мы можем определить фактор разделения и как отношение центробежной силы к силе тяжести.

Если нам известно значение линейной скорости движения вращаемого тела, то в соответствии с физическим смыслом понятие радиана (центральный угол, опирающийся на дугу, длина которой равна радиусу), угловая скорость вращения:

$$W = \frac{V_{\text{мин}}}{r} \quad (22)$$

Подставляя это значение в (21), получим:

$$K_p = \left(\frac{V_{\omega}}{r}\right)^2 \times \frac{r}{g} = \frac{V_{\omega}^2}{rg} \quad (23)$$

Если скорость вращения задана числом оборотов в минуту, то угловая скорость вращения:

$$W = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} \quad (24)$$

Подставив это значение в (21), получаем

$$K_p = \left(\frac{V_{\omega}}{r}\right)^2 \times \frac{r}{g} = \frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot r}{900 \cdot g} \quad (25)$$

Скорость осаждения определяется из равенства силы сопротивления и центробежной силы.

В области Стокса для самых мелких частиц при $Re < 2$ скорость осаждения:

$$W_{\text{осажд}} = W_{0\text{осажд}} \cdot K_p \quad (26)$$

где $W_{0\text{осажд}}$ – скорость осаждения данной частицы под действием силы тяжести.

В переходной области ($Re=2 \div 500$):

$$W_{\text{осажд}} = W_{0\text{осажд}} \cdot K_p \cdot 0,715 \quad (27)$$

В автомодельной области ($Re > 500$):

$$W_{\text{осажд}} = W_{0\text{осажд}} \cdot K_p \cdot 0,5 \quad (28)$$

Так как требуемая поверхность осаждения обратно пропорциональна скорости осаждения, то поверхность осаждения в центрифуге меньше поверхности отстойника при равной производительности в области Стокса в K_p раз, в переходной области в $K_p \cdot 0,715$ раз и в автономной области в $K_p \cdot 0,5$ раз.

Как известно, в общем случае центробежная сила C выражается равенством:

$$\check{N} = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot r} \quad (29)$$

где m – масса вращающегося тела, кг;

G - вес вращающегося тела, Н;

v - скорость, м/с;

r - радиус вращения, м.

Окружная скорость вращения определяется равенством:

$$v = \omega \cdot r = \frac{2\pi n}{60} \cdot r \quad (30)$$

где n – число оборотов в минуту;

ω - окружная скорость вращения, м/сек.

Сопоставляя равенства (29) и (30), найдем:

$$\check{N} = \frac{G}{rg} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60} r\right)^2 \quad (31)$$

или

$$C = \frac{Grn^2}{900} \quad (32)$$

Из выражения (32) следует, что увеличение числа оборотов ротора значительно больше влияет на возрастание

центробежной силы, чем увеличение диаметра ротора центрифуги.

Из равенства (29) видно, что ускорение в поле центробежных сил составляет $\omega^2 r$. Отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести называют фактором разделения:

$$K_p = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (33)$$

приняв величину $G = 1$ Н, из соотношений (29), (32), (33) получим:

$$K_p = \frac{r n^2 \pi^2}{900 g} \quad (34)$$

Например, для центрифуги с ротором диаметром 1000 мм ($r = 0,5$ м), вращающимся со скоростью $n = 1200$ об/минуту, фактор разделения составляет:

$$K_p = \frac{0,5 \cdot 1200^2}{900} = 800 \quad (35)$$

Фактор разделения является важной характеристикой центрифуг, так как, при прочих равных условиях, разделяющее действие центрифуги возрастает пропорционально величине K_p . Расчет скорости осаждения в поле центробежных сил может быть произведен по уравнениям, описывающим скорости осаждения за счет сил тяжести в переходной и автомоделной областях при подстановке в эти уравнения вместо критерия Ar произведение $Ar \cdot K_p$.

2.4 Перемешивание и диспергирование

Перемешивание в жидкофазных средах широко применяется в химической промышленности для получения гомогенных систем, для интенсификации химических, тепловых и диффузионных процессов, а также для приготовления

гетерогенных сред – эмульсий и суспензий. Реализация этих задач достигается сопутствующими перемешиванию одним и двумя процессами, которые принято называть гомогенизацией и диспергированием.

Различают турбулентное и ламинарное перемешивание.

Турбулентное перемешивание протекает в результате совместного действия циркуляционных течений, турбулентного переноса и молекулярной диффузии и происходит в различных неоднородных системах, таких как жидкость/жидкость, жидкость/газ или жидкость/твердое тело.

Ламинарное перемешивание осуществляется под действием сложного механического деформирования смешиваемых объемов, при котором происходит их вытягивание и наслаивание друг на друга.

Целью перемешивания является получение гомогенной смеси.

Диспергирование – это определяющий процесс при образовании эмульсий и суспензий. Он сопровождается разрушением агломератов до отдельных частиц дроблением жидкостей и газов на капли и пузыри под действием гидродинамических сил, возникающих в перемешиваемом объеме жидкости.

2.5 Псевдооживленный (кипящий) слой

Аппараты с кипящим слоем используют для перемещения и смешивания сыпучих материалов, для проведения процессов обжига, теплообмена, сушки, адсорбции, каталитических и других процессов.

При относительно небольших скоростях зернистый слой остается неподвижным и его характеристики не изменяются с

изменением скорости потока. Жидкость при этом просто фильтруется через слой. Однако, когда скорость достигает некоторой критической величины, слой перестает быть неподвижным, его порозность и высота начинают увеличиваться, слой приобретает текучесть и переходит как бы в кипящее (псевдооживленное) состояние. В таком слое частицы интенсивно перемещаются в потоке в различных направлениях, и весь слой напоминает кипящую жидкость, ограниченную ясно выраженной верхней границей раздела с потоком, прошедшим слой. При дальнейшем увеличении скорости потока порозность слоя и его высота продолжают возрастать вплоть до того момента, когда скорость достигает нового критического значения, при котором слой разрушается и твердые частицы начинают уноситься потоком. Явление массового уноса твердых частиц потоком газа называют псевдотранспортом и используют в промышленности для перемещения сыпучих материалов.

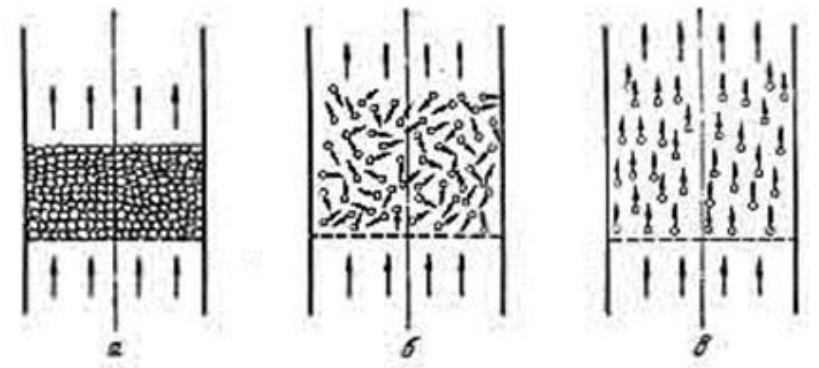


Рисунок 2 - Движение газа (жидкости) через слой твердых частиц

а – неподвижный слой, б – кипящий (псевдооживленный) слой, в – унос твердых частиц потоком.

3 Методики проведения работ

3.1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«Изучение кинетики процесса осаждения»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение процесса свободного осаждения частиц в различных средах из различных материалов под действием силы тяжести; построение графической зависимости $Re = f(Ar)$.

На основании проведенных экспериментов получить расчетное критериальное уравнение для любого режима. Сопоставить полученное уравнение с соответствующим уравнением (10-12).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из двух прозрачных цилиндров, заполненных разными жидкостями: водой и глицерином. Вверху и внизу каждого цилиндра нанесены метки, расстояние между которыми один метр. Чтобы исключить влияние ускоренного участка движения и обеспечить равномерность движения частицы, верхняя метка располагается на 10-12 см ниже уровня жидкости в цилиндре.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для проведения работы необходимо получить у лаборанта образцы частиц, штангенциркуль для измерения их диаметра (размеров) и секундомер. Замерить температуру в лаборатории.

Шарик замеренного диаметра помещают над поверхностью жидкости в цилиндре и отпускают. При достижении им верхней метки включают секундомер и измеряют время прохождения частицей расстояния между

метками. Каждый опыт дублируют трижды. После окончания опытов по измерению скорости осаждения частиц, например в воде, переходят к цилиндрам с другой средой.

Результаты измерений заносят в таблицу лабораторных наблюдений и обработки опытных данных.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработка результатов опытных данных включает расчет скорости свободного осаждения частиц, построение графической зависимости $Re = f(Ar)$, ее математическое описание и сравнение полученного уравнения с литературными данными (рис 3).

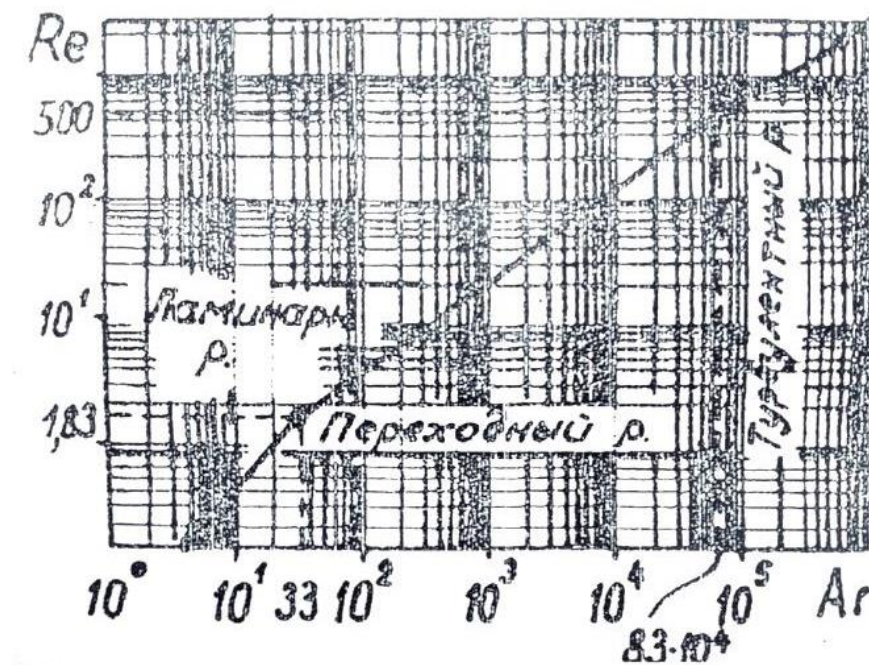


Рисунок 3 – График теоретической зависимости $Re = f(Ar)$.

Обработку полученных результатов проводят в следующей последовательности.

1. Для каждого опыта по результатам трех замеров рассчитывают средний диаметр частиц $d_{\text{ср}}$ и среднее время осаждения $\tau_{\text{ср}}$.

2. Определяется действительная скорость осаждения частиц по уравнению:

$$W_0 = \frac{l}{\tau_{\text{ср}}} \quad (36)$$

3. По рассчитанной скорости осаждения определяется значение критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{W_0 \times d_{\text{ср}}}{\nu} \quad (37)$$

где $d_{\text{ср}}$ - средний в опыте диаметр частиц, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости при температуре опыта, $\text{м}^2/\text{с}$.

Значения плотности и вязкости при различных температурах приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Плотность и вязкость жидкостей

Жидкость	Температура, $^{\circ}\text{C}$		
	10	20	30
	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$		
Глицерин	1120	1113	1106
Вода	1000	998	995
	Коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$		
Глицерин	26,8	18,9	12,6
Вода	13,7	10,07	8,05

4. Рассчитывается значение критерия Архимеда:

$$Ar = \frac{d_{\text{ср}}^3 (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) g}{\nu^2 \rho_{\text{ж}}} \quad (38)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – плотность материала частицы, кг/м³.

5. В логарифмических координатах по оси абсцисс откладывают значения критерия Архимеда, а по оси ординат – соответствующие величины критерия Рейнольдса, и через полученные таким образом точки проводят прямую для каждого режима осаждения.

6. Учитывая, что процесс гравитационного осаждения описывается уравнением вида $Re = mAr^n$, которое в логарифмических координатах характеризуется уравнением прямой линии $\lg Re = n \lg Ar + \lg m$. Показатель степени n соответствует тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс, а значение коэффициента m находят из выражения $\lg m = \lg Re - n \lg Ar$ для любой произвольно выбранной точки на этой прямой.

При работе на логарифмической сетке нанести значение Re и Ar для каждого проделанного опыта и построить графическую зависимость $Re = f(Ar)$. Прямая линия, построенная по экспериментальным точкам будет иметь угол наклона к оси абсцисс, тангенс которого равен показателю степени « n » и будет отсекают на оси ординат отрезок, численное значение которого равно коэффициенту « m » записать уравнение этой линии.

7. На логарифмической сетке даны графические зависимости (10-12). Сравнить их с экспериментальными, сделать анализ причин, приводящих к их расхождению.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ОТЧЕТУ:

1. Какие системы в гидромеханике называют

неоднородными?

2. Что является движущей силой процесса осаждения?

3. Какие силы действуют на частицу, осаждаемую в отстойнике (не проточный случай)?

4. Какие составляющие скорости действуют на частицу (случай проточного аппарата)?

5. Какие режимы обтекания частиц жидкостью вам известны?

6. Что происходит с частицами при осаждении свободном и степенном (движении частиц)?

7. Какие силы преобладают при ламинарном режиме обтекания частиц жидкостью?

8. Что такое коэффициент формы осаждаемой частицы?

9. Влияет ли высота отстойника на его производительность?

3.2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«Определение констант процессов фильтрования»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение констант процесса фильтрования, а также производительности фильтра по фильтрату и влажному осадку.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАБОТНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проведения лабораторных опытов по определению констант фильтрации на элементе вакуум-фильтра (рисунок 4) состоит из емкости для суспензии 1, внутри которой помещена трубка барботера 9 для перемешивания суспензий, воронка Бюхнера 3 с фильтрующей перегородкой из фильтровальной ткани 4, приемника фильтрата 6, вакуумметра 5 и вакуум-насоса 8. Отдельные части установки соединены

между собой вакуумными трубками.

Примечание: под фильтрующую ткань в воронку Бюхнера может быть помещена металлическая сетка. Замер времени выполняется секундомером.

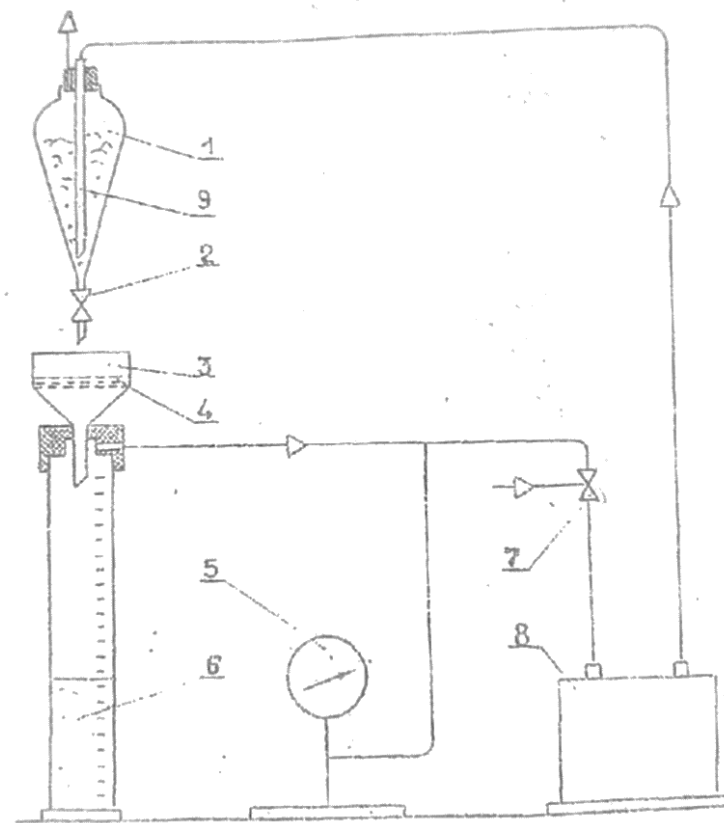


Рисунок 4 – Схема установки определения констант фильтрации на элементе вакуум-фильтра.

1 – емкость для суспензии, 2 – кран, 3 – воронка Бюхнера, 4 – фильтрующая ткань, 5 – вакуумметр, 6 – приемник фильтрата, 7 – воздушный кран, 8 – вакуум-насос, 9 – барботер.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для приготовления суспензий в емкость 1 заливают 150 мл воды. Суспензию готовят в соотношении твердая фаза – жидкость по указанию преподавателя. Включают вакуум-насос 8. Откачиваемый воздух будет поступать в барботер и перемешивать жидкость. Открывая кран 7 устанавливают заданный руководителем вакуум по вакуумметром. Открывают кран 2 и заполняют воронку суспензий. Включают секундомер при появлении первых капель фильтрата в приемнике 6. Через некоторое время, когда в приемнике наберется 30 мл фильтрата, производят, не выключая секундомер, замер времени и собранного фильтрата V' . Такие замеры времени и объема фильтрата производят, не выключая секундомер и считая их от начального момента фильтрования. Результаты замера заносят в таблицу. После этого, не выключая насос, выключают секундомер. Затем измеряют металлической линейкой толщину слоя осадка на фильтре и диаметр всего слоя.

Фильтр разбирают, осадок снимают в специальный бачок, промывают емкость суспензии, барботер, фильтрующую ткань, протирают воронку Бюхнера.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По полученным замерам объемов $V_1, V_2 \dots$ до V_n и времени $\tau_1, \tau_2 \dots$ до τ_n , определяют разности и вычисляют отношение $\Delta\tau_1/\Delta V_1, \Delta\tau_2/\Delta V_2 \dots$ до $\Delta\tau_n/\Delta V_n$. Затем строят график, откладывая по оси ординат величины отношений от $\tau_1/\Delta V_1$, до $\Delta\tau_n/\Delta V_n$. Так как отношения $\Delta\tau/\Delta V$ являются средней величиной для соответствующих интервалов ΔV , то величины этих отношений следует откладывать по вертикали из середины однозначных интервалов, либо, проводя прямую через середины

отрезков a_1b_1 , a_2b_2 и т.д., как об этом сказано выше.

Для определения константы K находим тангенс угла наклона прямой (рисунок 5) как отношение катетов, взятых в соответственных масштабах. Например:

$$tg\alpha = \frac{\Delta\tau_4/\Delta V_4 - \Delta\tau_1/\Delta V_1}{V_3 + (V_4 - V_3)/2 - V_1/2} \quad (39)$$

Из выражения $tg\alpha = \frac{2}{K}$ находим константу фильтрования K :

$$K = \frac{2}{tg\alpha} \quad (40)$$

Константу C находим непосредственно замером отрезка ДО по рисунку 5.

Далее определяют скорости фильтрования в начальный и конечный моменты:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V_1 + C)} \quad (41)$$

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V_n + C)} \quad (42)$$

Работу заканчивают определением часовой производительности фильтра по фильтрату и влажному осадку:

$$V_{cp} = \frac{V_n 3600}{F_{cp} \tau_n}, \quad V_{oc} = \frac{V_{oc} 3600}{F_{cp} \tau_n} \quad (43)$$

где V_{cp} – общее количество фильтрата, собранное за время опыта, $м^3$;

V_{oc} – объем осадка, равный $F_{\phi} h_{сл}$, $м^3$;

F_{ϕ} – площадь фильтра, $м^2$;

τ_n – продолжительность опыта, с.

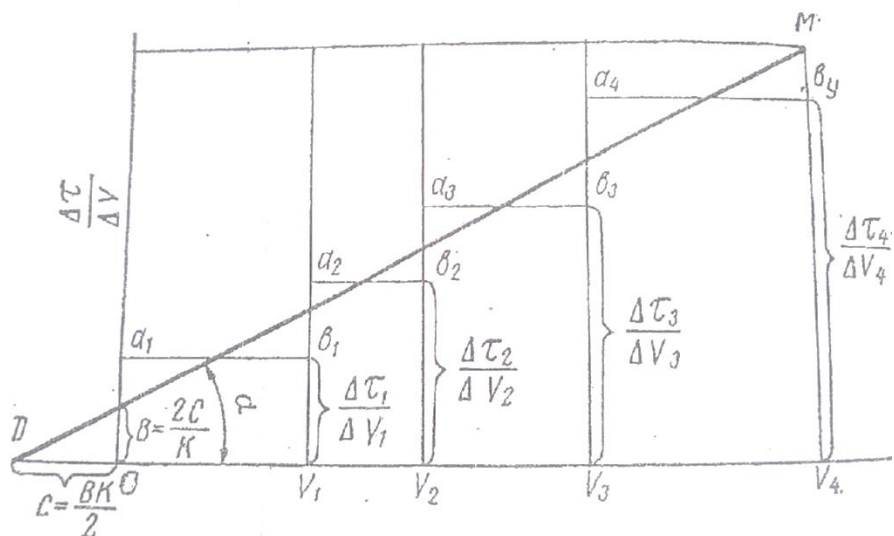


Рисунок 5. К определению констант процесса фильтрации

Провести исследования скорости фильтрации от площади фильтра, концентрации и природы твердой фазы в суспензии.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ОТЧЕТУ

1. Что является движущей силой процесса фильтрования?
2. Что такое скорость фильтрации, от чего она зависит?
3. Как определяется скорость фильтрования?
4. Из чего складывается сопротивление фильтрованию?
5. Какими способами может быть создана разность давлений по обе стороны фильтрующей перегородки?
6. Какие применяются фильтрующие перегородки?
7. Чем обусловлен выбор фильтрующей перегородки?
8. Что характеризует константы процесса фильтрования?

3.3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«Разделение гетерогенных систем в поле центробежных сил»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение теоретических основ разделения суспензии методом центрифугирования.

2. Изучение устройства и принципа действия осадительной центрифуги.

3. Исследование влияния режимных параметров (числа оборотов ротора, продолжительности процесса) на степень разделения суспензий.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 6) состоит из ротора 1, электродвигателя 2, рабочих кювет 3, пробирок с исследованными системами 4 и пульта управления 5.

На пульте управления смонтирован часовой механизм для автоматического выключения привода центрифуги, тахометр для контроля числа оборотов ротора, пакетный переключатель числа оборотов ротора и кнопка электромагнитного тормоза.

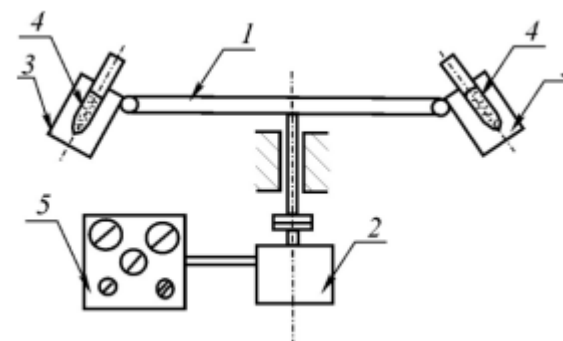


Рисунок 6 – Схема лабораторной установки

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

В две пробирки наливаются по 5 мл 0,1N раствора хлорида или сульфата железа (III), а затем к ним добавляются по 5 мл 0,1N раствора аммиака или едкого натра.

Пробирки устанавливаются в центрифугу симметрично относительно оси вращения в стаканчики ротора центрифуги.

Включите центрифугу кнопкой «СЕТЬ».

Закройте крышку центрифуги.

Установите на центрифуге при помощи соответствующих кнопок частоту вращения и время. Выключение происходит через заданный интервал автоматическом режиме.

Извлеките любую пробирку из центрифуги и при помощи линейки измерьте высоту осадка, после чего зажав пальцем интенсивно встряхните и поместите обратно.

Результаты измерений занесите в табл.2. Возможно повторение процесса со следующей пробиркой и т.д.

Таблица 2 – Таблица экспериментальных данных

№ пробирки	Число оборотов, об/мин	Время центрифугирования t , мин	Высота слоя фугата, мм	Объемы, мм ³			Фактор разделения, F
				Суспензии	Фугата	Осадка	

Опыт повторяют на различной частоте и продолжительности процесса, а также необходимо исследовать влияние природы суспензии на процесс центрифугирования.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определите объем влажного осадка по формуле:

$$V_{oc} = V_c - V_{\phi} \quad (44)$$

где V_c – объем суспензии, мм³;

V_{ϕ} – объем фугата, мм³.

$$V_{\phi} = h_1 \frac{\pi d^2}{4} \quad (45)$$

где h_1 – высота слоя фугата, мм;

d – диаметр пробирки, мм.

2. Рассчитайте фактор разделения;

3. Определите степень уплотнения осадка:

$$\Delta = \frac{V_{oc} - V'_{oc}}{V_{oc}} \quad (46)$$

где V_{oc} – первоначальный объем осадка, мм³;

V'_{oc} – объем осадка в данный момент времени, мм³.

4. Постройте зависимость изменения объема влажного осадка от времени центрифугирования $V_{oc} = f(\tau)$ при различных числах оборота ротора.

5. Постройте зависимость степени уплотнения осадка от фактора разделения $\Delta = f(Kp)$.

6. Составьте отчет и сделайте выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ОТЧЕТУ:

1. Типы и конструкции осадительных центрифуг?
2. Параметры, характеризующие работу центрифуг?
3. Что такое фактор разделения?
4. Достоинство и недостатки осадительных центрифуг?
5. Достоинство и недостатки отстойных центрифуг?
6. От чего зависит производительность центрифуги?
7. Из каких основных элементов состоит центрифуга?

3.4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

«Изучение процесса псевдоожижения»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение процесса псевдоожижения слоя зернистого материала; расчет теоретических коэффициентов: псевдоожижения и гидравлического сопротивления потока газа в поровых каналах зернистого слоя и сравнение их с коэффициентами, полученными экспериментальным путем.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис 7) состоит из прозрачного сосуда 9 со слоем зернистого материала. С помощью нагнетающего компрессора 4 через слой зернистого материала подается поток воздуха.

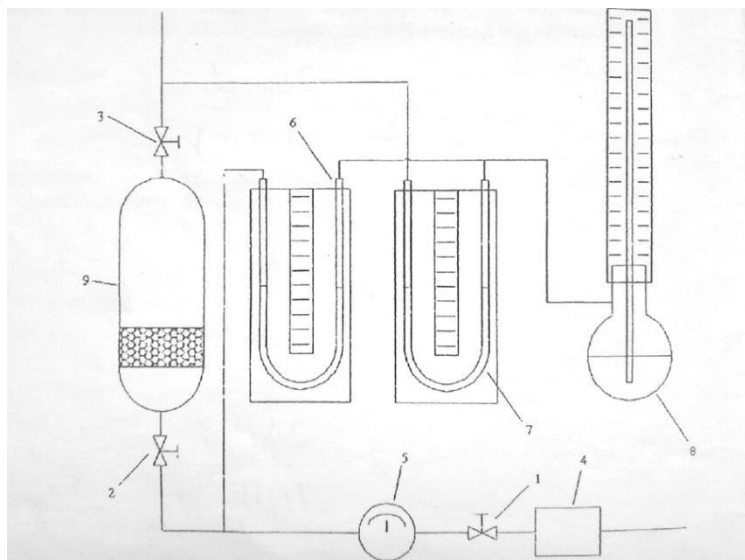


Рисунок 7 – Схема лабораторной установки

1,2,3 – краны, 4 – нагнетающий компрессор, 5 – газометр, 6,7,8 – дифманометры, 9 – сосуд со слоем зернистого материала.

Расход воздуха измеряется газометром 5, перепады давления наверху и внизу слоя зернистого материала измеряются с помощью двух жидкостных дифманометров 6,7.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для начала проведения работы необходимо подготовить установку. Для этого сначала открывают краны 2,3 сверху и снизу сосуда 9, содержащего слой зернистого материала и затем включают компрессор 4.

Постепенным открыванием крана 1 добиваются получения перепадов давлений наверху и внизу слоя зернистого материала. После достижения стабильного режима установки производят замер перепадов давлений по дифференциальным манометрам 6 и 7. Результаты измерений заносят в таблицу 1 лабораторных наблюдений и обработки опытных данных.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработка результатов опытных данных включает в себя расчет теоретического и практического коэффициентов псевдооживления K , а также коэффициента гидравлического сопротивления потока газа в поровых каналах λ .

Обработку полученных данных производят следующим образом:

1. Рассчитывают критическую скорость начала псевдооживления:

$$Re_k = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (47)$$

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_t - \rho) \rho}{\mu^2} \quad (48)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;

ρ_t, ρ – соответственно плотность частиц и газа, кг/м³;

d -диаметр гранул сферической формы, м.

$$Re_k = \frac{W_k \cdot \rho \cdot d}{\mu} \quad (49)$$

$$W_k = \frac{\mu}{\rho \cdot d} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (50)$$

2. Рассчитывают высоту насыпного слоя зернистого материала:

$$H_0 = \frac{m}{S(\rho_m - \rho)(1 - \varepsilon_0)} \quad (51)$$

где S – площадь сечения стояка, м^2 ;

m – масса зернистого материала, кг ;

ΔP – перепад давления в потоке со слоем зернистого материала, Па ;

$\varepsilon_0 = 0,4$ – порозность плотного зернистого материала;

H_0 – высота насыпного слоя, м .

3. Рассчитывают теоретическую скорость потока взвеси по формуле Эргуна:

$$g(\rho_m - \rho)(1 - \varepsilon_0) = 150 \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \frac{\mu W}{d^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_0) \cdot \rho W^2}{\varepsilon_0^3 \cdot d} \quad (52)$$

4. Рассчитывают практическую скорость потока взвеси:

$$W_{\text{практ}} = \frac{Q}{S} \quad (53)$$

где Q – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

S – площадь сечения стояка, м^2 .

$$Q = \frac{G}{t} \quad (54)$$

где G – показания газометра, м^3 ;

t – время опыта, с .

5. Определяют коэффициент псевдоожижения:

$$K = \frac{W}{W_k} \quad (55)$$

6. Находят расчет теоретической и практической коэффициент гидравлического сопротивления потока газа в

поровых каналах зернистого слоя

$$\lambda = \frac{2\Delta P_u d_k}{H_0 W_0^2 \rho} \quad (56)$$

$$\Delta P_u = \lambda \frac{H_0 W_0^2 \rho}{d_k^2} \quad (57)$$

$$d_k = \frac{2\varepsilon_0 d}{3(1-\varepsilon_0)} \quad (58)$$

где d_k – эквивалентный диаметр поровых каналов;

ε_0 – порозность;

$$W_0 = \frac{W}{\varepsilon_0} \quad (59)$$

где W_0 – средняя скорость газа в поровых каналах слоя.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ОТЧЕТУ:

1. Что называется псевдоожигением?
2. Чем отличается псевдоожиженный слой от фильтрующего?
3. Что называется порозностью слоя?
4. Что называется кривой псевдоожижения?
5. Чем обусловлено наличие пика давления на реальной кривой псевдоожижения?
6. Почему кривая псевдоожижения снимается на обратном ходе?
7. Что такое число псевдоожижения?
8. Как зависит порозность от числа псевдоожижения?
9. Чем отличается скорость витания частиц от скорости уноса?

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы и аппараты химической технологии: методические указания / Н.И. Еникеева, Н.Б. Сосновская и др. – Казань: Издательство КНИТУ, 2014. – 72 с. [Электронный ресурс]. – <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428783>
2. Суханов П.П., Разинов Ю.И. Гидравлика и гидравлические машины. - Казань: КГТУ, 2010 - 159 с.
3. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Гидравлика: учеб. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 2008. - 199с.
4. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями: учеб. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 2007. - 192с.
5. Лахмаков В.С., Коротинский В.А. Основы теплотехники и гидравлики: учеб. пособие для вузов. – Минск: РИПО, 2015 - 220 с.
6. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов — Стер. изд. — М.: Альянс, 2014. — 753с.
7. Комиссаров, Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие/ под ред. Ю.А. Комиссарова / под ред. Ю.А. Комиссарова — М.: Химия, 2011. — 1230с.
8. Павлов, К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов, изд. 10-е. — М.: Альянс, 2013. — 576с.
9. Новый справочник химика и технолога: Процессы и аппараты химических технологий/ под ред. Г.М. Островского — СПб.: Профессионал, 2010. — 848с.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Астраханский государственный технический университет
Институт нефти и газа**

Кафедра «Химическая технология переработки нефти и газа»

(название лабораторной работы)

Студент: _____

Группа: _____

Проверил: _____

Дата: _____

Астрахань – 20__

