

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 14.11.2022 14:44:40

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1e1ca0b73e743d4b4851fda56c0789

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра теплогазоводоснабжение

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О. Г. Локтионова

« 15 »

Юго-Западный
государственный
университет
(ЮЗГУ)

2017 г.



ГИДРОГАЗОДИНАМИКА

Методические рекомендации

для выполнения лабораторных работ студентов направлений
подготовки 13.03.01 и 20.03.01 очной и заочной форм обучения.

КУРСК 2017

УДК 621.226

Составители: Е.М. Кувардина, Н.Е. Семичева

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор кафедры
«Теплогазоводоснабжение» Морозов В.А.

Гидрогазодинамика: для выполнения лабораторных работ студентов направлений подготовки 13.03.01 и 20.03.01 очной и заочной форм обучения /Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Е. М. Кувардина, Н. Е. Семичева. - Курск, 2017.- 36 с.

Излагаются методические рекомендации к выполнению лабораторных работ

Предназначены для студентов направлений подготовки 13.03.01 и 20.03.01 очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 15.12.17. Формат 60x84 1/16
Усл.печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 2,9. Тираж 30 экз. Заказ. 3300
Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет
305040. г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Лабораторная работа № 1

Тема: Определение режима течения жидкостей

Мотивация цели состоит в изучении режимов движения жидкостей, наблюдении за характером движения подкрашенной струйки при различных скоростях жидкости и определении значения Re для различных режимов течения.

Цель самоподготовки. Для проведения данного занятия студент должен знать:

1. существующие режимы движения жидкости;
2. численные значения числа Рейнольдса соответствующие этим режимам.

План проведения лабораторной работы:

Контроль исходного уровня знаний;

выполнение лабораторной работы;

обработка полученных данных;

анализ полученных данных;

ответ на контрольные вопросы

Источники информации.

1. Кудинов В.А. Гидравлика. М.: Высшая школа, 2007 г.-199 с.
2. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Изд. Центр «Академия»; 2010 г.-269 с.
3. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлика с решениями. М.: Высшая школа. 2007 г. 192 с.
4. Артемьева Т.В. и др. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.-336 с.
5. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учебное пособие для вузов/ -М.: Стройиздат,2002. -397 с.
6. Большаков В.А. и др. –Сборник задач по гидравлике. -Киев Вища школа, 1979. -336 с.

Вопросы для самоконтроля:

1. Режимы движения жидкостей.
2. Физический смысл числа Рейнольдса.
3. Распределение скоростей в ламинарном и турбулентном потоках.
4. Уравнение Пуазейля (расхода в ламинарном потоке).
5. Гидравлический радиус и эквивалентный диаметр.
6. Условия существования ламинарного режима.
7. Параболический закон распределения скоростей
8. Закон Ньютона.

Контрольные задания.

1. Оформить отчет в установленной форме.
2. Изучить и зарисовать схему экспериментальной установки.

Методика проведения лабораторной работы

1. Заполнить установку (рис.1) водой.

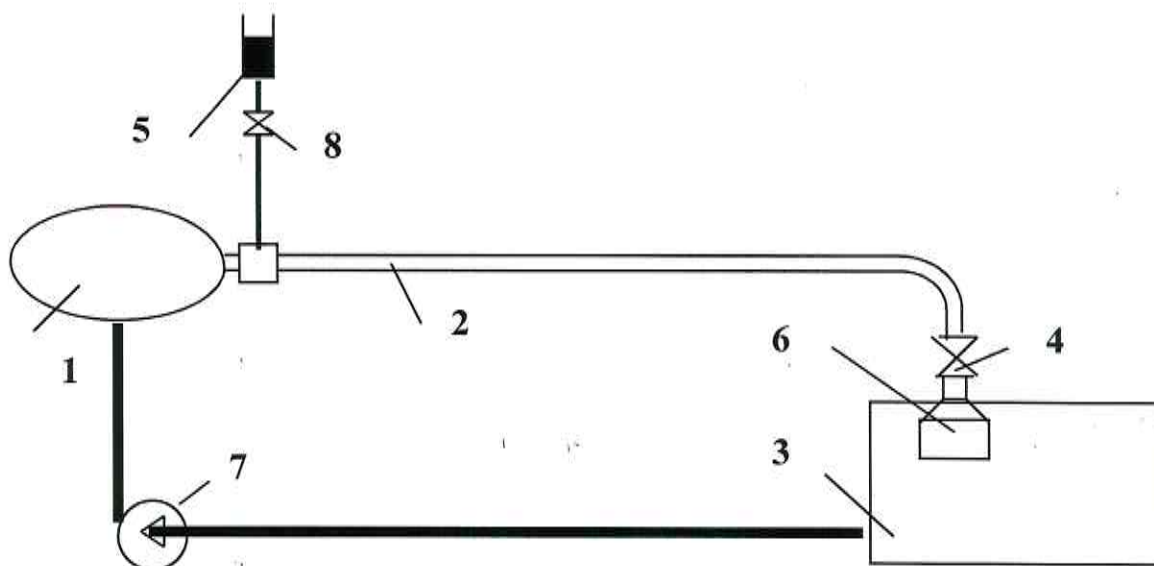


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Поток воды в установке создается циркуляционным насосом 6. Расход воды регулируется вентилем 4. Вход в экспериментальную трубу 2 выполнен в виде плавного конического сужения. Над расходным баком 1 установлен бачок 5 с краской, которая поступает по капилляру в стеклянную трубу 2 через вентиль 8. Изменяя расход воды, получают различные режимы движения жидкости: при плавной траектории движения подкрашенной струйки режим движения ламинарный, при вихревом - турбулентный.

2. Включить насос и вентилем 4 установить минимальный расход воды в системе.

3. Вентилем 8 отрегулировать поток краски таким образом, чтобы скорости струи краски и потока воды были одинаковы.

4. Измерить расход воды и отмечают режим движения.

5. Провести еще 2-3 опыта с увеличенным расходом воды так, чтобы в экспериментальной трубе наблюдались ламинарный и турбулентный режимы движения.

6. Выключить насос.

7. Обработать опытные данные. Результаты измерений занести в таблицу.

10. Оформить протокол испытания с включением схемы установки и обработки опытных данных.

Опытные и расчетные данные

Таблица

Объем, $V, \text{л}$	Время, $\tau, \text{с}$	Расход, $Q, \text{м}^3/\text{с}$	Скорость, $w, \text{м}/\text{с}$	Число Re	Режим

Температура $t = \underline{\hspace{2cm}}$ С.
Диаметр трубки $d = \underline{\hspace{2cm}}$ м.

Кинематическая вязкость $\mu = \underline{\hspace{2cm}}$ м²/с.

Расход $Q=V/\tau$, м³/с.

Скорость $w=Q/S=Q/(0.785 \cdot d^2)$, м/с.

Критерий Рейнольдса $Re=w \cdot d/v$.

Общие сведения

При движении жидкостей с малыми скоростями струи потока движутся по эквидистантным траекториям, плавно огибая препятствия и не смешиваясь друг с другом. Такое движение называется ламинарным. Пристенный слой жидкости, в силу его прилипания к стенкам, неподвижен, а максимальная скорость наблюдается на оси потока. В соответствии с законом Стокса распределение скоростей в ламинарном потоке подчиняется параболическому закону

$$W = W_m \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right), \quad (1)$$

где W_m - скорость осевого потока; r - радиус кольцевого потока, движущегося со скоростью w ; R - радиус трубопровода.

При увеличении скорости движения потока разница скоростей двух соседних слоев жидкости увеличивается, и в критический момент эта разница становится достаточной для того, чтобы скольжение слоев сменилось на интенсивное перемешивание. При этом в пристенной области остается ламинарное движение со скольжением слоев, а в ядре потока происходит вихреобразование, и поток становится турбулентным. Скорости частиц в ядре потока постоянно изменяются по направлению и величине. При этом средние значения скоростей имеют одинаковое направление с вектором средней скорости потока. Параболическая эпюра скоростей, характерная для ламинарного потока, сохраняется в пристенной области. В ядре потока скорости изменяются по кривой более пологой, чем парабола.

Ламинарный поток

$$W_{cp} = 0.5 \cdot W_m$$

Турбулентный поток

$$W_{cp} = 0.85 \cdot W_m$$

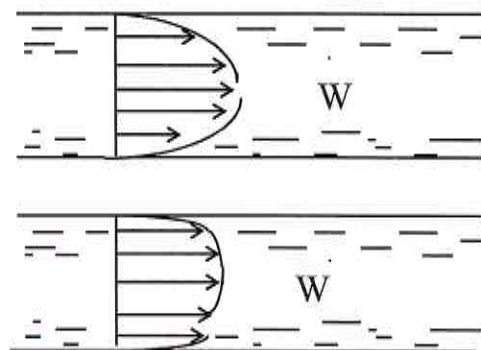


Рис. 1. Эпюры скоростей в потоке жидкости

Существование двух режимов течения жидкостей отмечалось Д.И.Менделеевым. Подробное изучение режимов было проведено О.Рейнольдсом, который в 1883 г. опубликовал результаты экспериментальных исследований по изучению режимов течения жидкостей. Рейнольдсом был получен безразмерный параметр, который впоследствии был назван критерием или числом Рейнольдса

$$Re = \frac{W \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{W \cdot d}{\nu} \quad (2)$$

В зависимости от численного значения критерия Рейнольдса наблюдается тот или иной режим движения жидкости.

$$R = \frac{\omega}{\Pi} = \frac{\pi d^2 / 8}{\pi d / 2} = d / 4$$

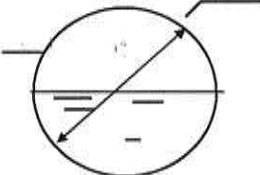
$$d_{\text{э}} = 4 \cdot R = d$$


Рис. 2. Определение эквивалентного диаметра потока

При $Re < 2320$ режим движения будет ламинарный, а при $Re > 10000$ наблюдается турбулентный режим. Значение числа Рейнольдса $Re_{кр} = 2320$ называется критическим. В интервале значений критерия Рейнольдса 2320-10000 возможно существование ламинарного режима, но внесение в поток малейших возмущений приводит к необратимому переходу в турбулентный режим. Если же возмущения вносятся в поток при $Re < 2320$, то после прекращения их действия восстанавливается ламинарный режим движения.

Определение режима движения в трубах некруглого сечения, при безнапорном движении жидкости в круглых трубах и каналах производится по критерию Рейнольдса, который записывается в следующем виде

$$Re = W d \rho / \mu \quad \text{или} \quad Re = W \cdot d_{\text{э}} / \nu \quad (3)$$

где $R = S / \Pi$ - гидравлический радиус, равный отношению площади живого сечения S к смоченному периметру Π , м; $d_{\text{э}} = 4 \cdot S / \Pi$ - эквивалентный диаметр потока.

Смоченный периметр - это линия соприкосновения потока с твердыми стенками трубы или канала.

Гидравлический радиус для круглой трубы, работающей полным сечением, равен половине геометрического $R = r / 2 = d / 4$.

Критическое число Рейнольдса при подсчете по формуле (3) будет в четыре раза меньше, т.е. $Re_{кр} = 580$.

Тема. Экспериментальная проверка уравнения Д.Бернулли.

Мотивация цели состоит в экспериментальной проверке уравнения Бернулли и построении диаграммы Бернулли для реального трубопровода.

Цель самоподготовки. Для проведения данного занятия студент должен знать:

- 1.Какие режимы движения жидкости существуют.
- 2.Уравнение Бернулли для реальной и идеальной жидкости.
- 3.Энергетическая и геометрическая интерпретация уравнения Бернулли.

План проведения лабораторной работы:

Контроль исходного уровня знаний;

выполнение лабораторной работы;

обработка полученных данных;

анализ полученных данных;

ответ на контрольные вопросы

Источники информации.

1. Кудинов В.А. Гидравлика. М.: Высшая школа, 2007 г.-199 с.
2. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Изд. Центр «Академия»; 2010 г.-269 с.
3. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлика с решениями. М.: Высшая школа. 2007 г. 192 с.
4. Артемьева Т.В. и др. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.-336 с.
5. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учебное пособие для вузов/ -М.: Стройиздат,2002. -397 с.
6. Большаков В.А. и др. –Сборник задач по гидравлике. -Киев Вища школа, 1979. -336 с.

Вопросы для самоконтроля:

- 1.Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной и реальной жидкости.
- 2.Энергетическая и геометрическая интерпретации уравнения Бернулли.
- 3.Скоростной, статический, пьезометрический и гидродинамический напоры.
- 4.Построение идеальной и реальной диаграмм Бернулли для трубопроводов.
- 4.Построение схемы трубопроводов по идеальной или реальной диаграмме Бернулли.
- 5.Уравнение неразрывности потока.

Контрольные задания.

1. Оформить отчет в установленной форме.
2. Изучить и зарисовать схему экспериментальной установки.

Методика проведения лабораторной работы.

1. Заполнить установку (рис 1) водой, и вентилями 4 и 6 установить расход воды в экспериментальном трубопроводе. Перекидной лоток установить в положение слива воды в буферную емкость 7.

2. Снять показания пьезометров. Внимание! Замеры проводить при постоянном уровне жидкости в пьезометре на входе в трубопровод. Если соотношение показаний пьезометров отличается от показанных пьезометров на схеме установки, то в соединительных шлангах образовались воздушные пробки, которые должны быть удалены.

3. Слив воду из мерника 9 в канализацию, измерить расход воды, для чего перекинуть лоток 8 в положение подачи воды в мерник и включить секундомер. Выключение секундомера произвести при заполнении мерника на 10 л.

4. Закрыть вентили 4 и 6.

5. Слить воду в канализацию из буферной емкости.

6. Результаты измерений занести в таблицу.

Опытные и расчетные параметры

Таблица 1

Сечение трубопровода	Скорость, W с/сек.	Число Рейнольдса, Re	Показание пьезометров, м	Напор статический, h_c	Напор динамический, H	Геометрическая высота, м

7. Обработка опытных данных

7.1. Расход $Q = V/\tau$, m^3/c .

Объем, $V = \text{---} m^3$; время, $\tau = \text{---} c$; температура $t = \text{---} C^0$;
 кинематическая вязкость $\nu = \text{---} m^2/c$; диаметры сечений: $d_1 = \text{---} m$, $d_2 = \text{---} m$, $d_3 = \text{---} m$.

7.2. Скорость воды определить из уравнения неразрывности потока $Q = w_1 \cdot S_1 = w_2 \cdot S_2 = w_3 \cdot S_3$, $w = Q/S$, м/с,
 где $S_i = 0.785 \cdot d_i^2$, m^2 ; d - диаметр рассчитываемого сечения, м.

7.3. Критерий Рейнольдса $Re = w \cdot d/\nu$.

7.4. Скоростной (динамический) напор $h_0 = \frac{\alpha w^2}{2g}$,

где $\alpha = 1.1$ при $Re > 10000$; $\alpha = 2$ при $Re < 2320$ и при промежуточных значениях числа Рейнольдса $\alpha = 1.1 + 0.9 \frac{10000 - Re}{8680}$.

7.5. Гидростатический напор $h = 1.12 + \Pi - Z$, м.

7.6. Полный гидродинамический напор

$$H = Z_i + \frac{P_i}{\rho g} + \frac{\alpha_i w_i^2}{2g} = 1.12 + \Pi_i + \frac{\alpha_i w_i^2}{2g}, \text{ м.}$$

7.7. Потери напора $h_i = H_{11} - H_{33}$, м.

7.8. Построение диаграммы Бернулли. По значениям нивелирной высоты Z , пьезометрического напора Π и гидродинамического напора в координатах

напор - длина трубопровода строят графические зависимости напоров от длины трубопровода.

Опытная установка

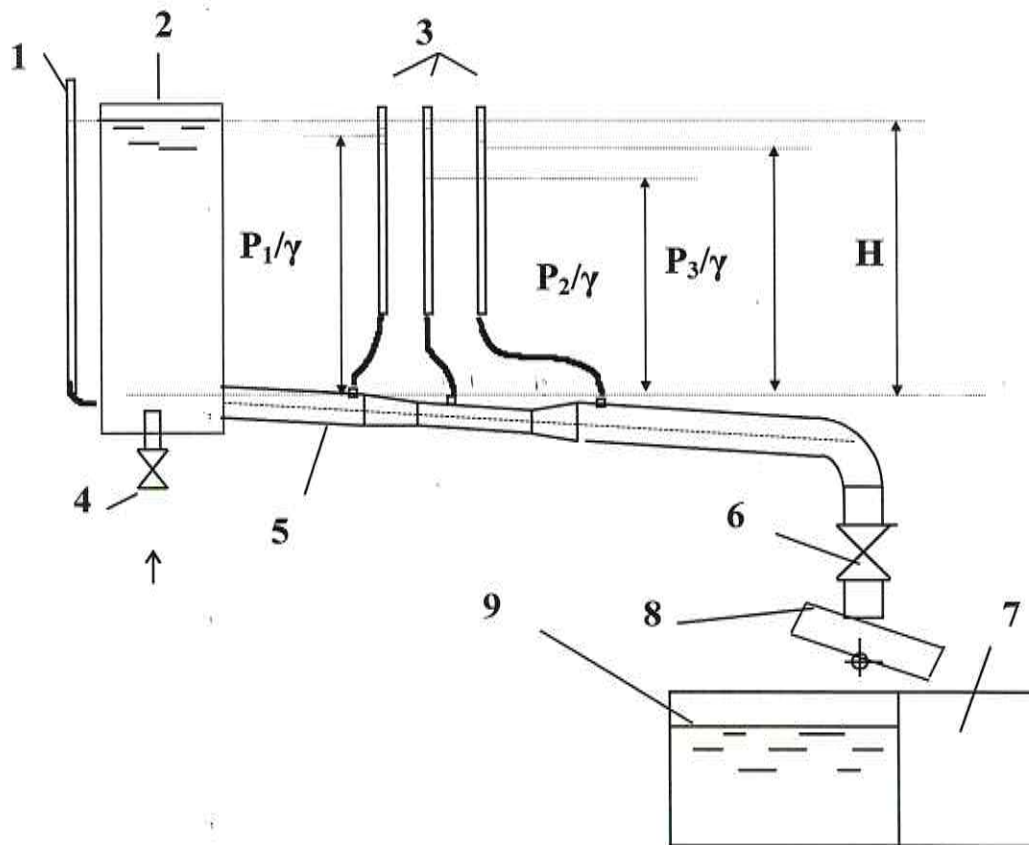


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Принципиальная схема установки показана на рис.1. Основными узлами установки являются: напорный бак 2 с пьезометром 1, пьезометры 3, экспериментальный трубопровод переменного сечения 5, мерник расхода 9, вентили 4 и 6, перекидной лоток 8, буферный бак 7. Вода из напорного бака 2 по экспериментальному трубопроводу 5, в зависимости от положения лотка 8, поступает в мерник расхода 9 или буферный бак 7. Пьезометр 1 показывает гидродинамический напор на входе в экспериментальный трубопровод, пьезометры 3- пьезометрические напоры в контрольных сечениях трубопровода. Уровень жидкости в расходном баке 2 поддерживается за счет поступления воды из сети через вентиль 4. Расход воды в экспериментальном трубопроводе регулируется вентиляем 6.

Общие сведения

Уравнение Бернулли является одним из основных уравнений гидравлики и для элементарной струйки имеет вид

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{W_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} \quad (1)$$

Для установившегося, плавно изменяющегося потока жидкости, уравнение Бернулли отличается коэффициентом Кориолиса или

коэффициентом кинетической энергии, который представляет собой отношение действительной кинетической энергии к кинетической энергии, вычисленной в предположении, что все частицы потока имеют его среднюю скорость

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 w_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 w_2^2}{2g}, \quad (2)$$

где α - коэффициент Кориолиса (для турбулентных потоков $\alpha=1.1$, ламинарных - $\alpha=2$); Z - высота расположения центра сечения потока от плоскости отсчета, м; P_1 - статическое давление, Па; P - удельный вес жидкости, н/м³; w - средняя скорость потока, м/с; g - ускорение свободного падения, м/с².

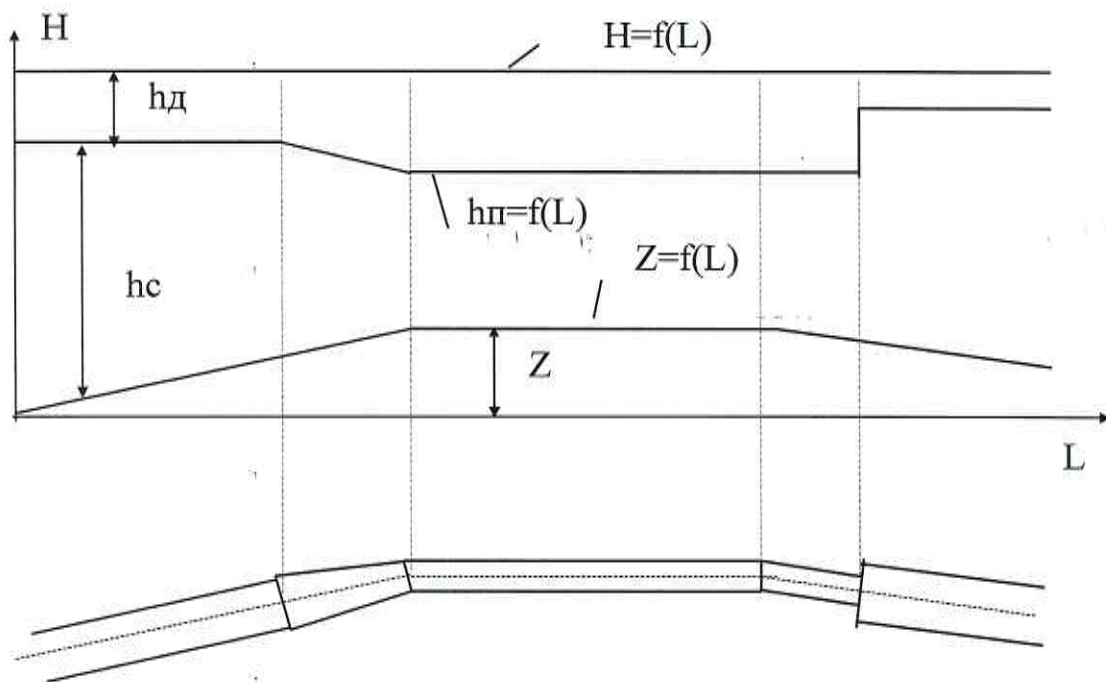


Рис.2. Диаграмма Бернулли для идеальной жидкости

В энергетической интерпретации уравнение Бернулли представляет полную (кинетическая $\frac{\alpha w^2}{2g}$ + потенциальная $Z+P/\gamma$) энергию 1 кг движущейся жидкости и является следствием общего закона сохранения энергии в применении к гидродинамике.

В геометрической интерпретации уравнение Бернулли представляет полный (гидродинамический) напор, равный сумме нивелирной высоты Z ; статического напора P/γ и динамического напора $\frac{\alpha w^2}{2g}$. Обычно геометрическая интерпретация представляется диаграммой Бернулли, которая является графической зависимостью гидродинамического напора, пьезометрического напора и нивелирной высоты от длины трубопровода.

На рис.2 $Z=f(L)$ - линия нивелирных высот; $h_{п}=Z+P/\gamma=f(L)$ - пьезометрическая линия; $H= Z+P/\gamma + \frac{\alpha w^2}{2g}=f(L)$ - линия гидродинамического напора.

Для реальной жидкости (рис. 3) учитываются потери напора h_i между сечениями, для которых составляется уравнение Бернулли.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 w_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 w_2^2}{2g} + h \quad (3)$$

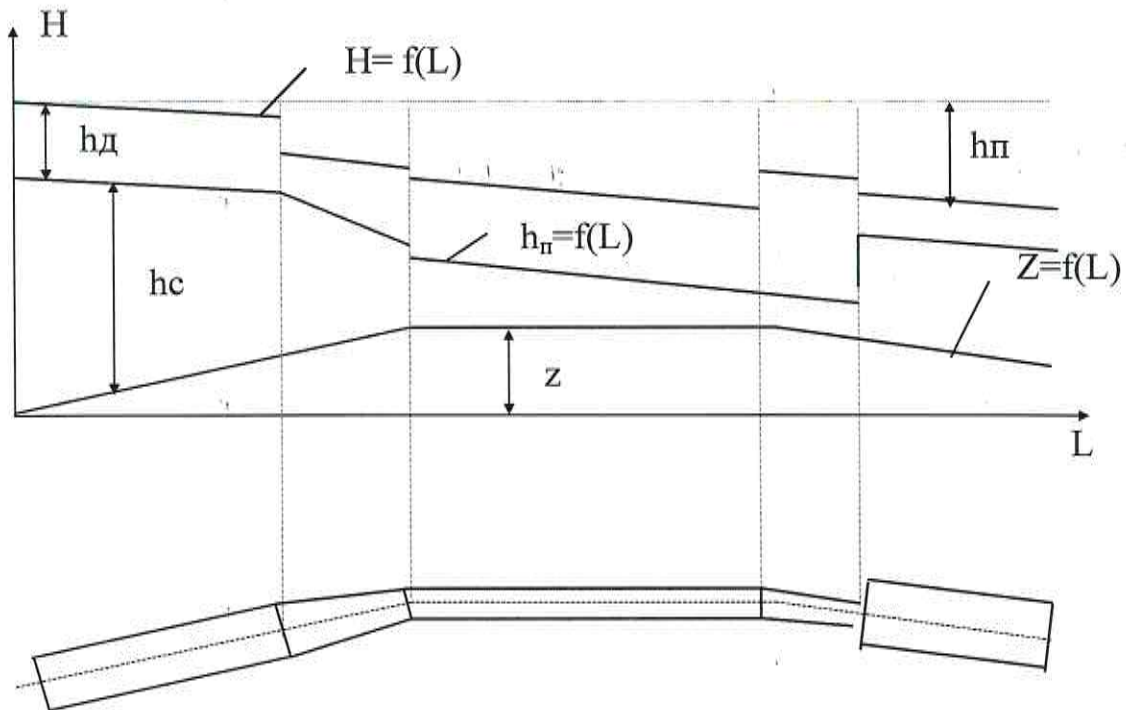


Рис.3. Диаграмма Бернулли для реальной жидкости

Отношение разности нивелирных высот, пьезометрических напоров и гидродинамических напоров к длине трубопровода между рассматриваемыми сечениями называют геометрическим, пьезометрическим и гидродинамическим уклоном, соответственно.

Лабораторная работа № 3

Тема: Определение коэффициента гидравлического трения

Мотивация цели состоит в освоении методики гидравлического эксперимента и определении коэффициента гидравлического трения при движении воды по горизонтальной трубе.

Цель самоподготовки. Для проведения данной работы студент должен знать;

Что такое коэффициент трения.

Виды энергетических потерь жидкости при движении по трубопроводу.

Критериальное уравнение, определяющее установившееся движение жидкости.

План проведения лабораторной работы

Контроль исходного уровня знаний;

выполнение лабораторной работы;

обработка полученных данных;

ответ на контрольные вопросы.

Источники информации

1. Кудинов В.А. Гидравлика. М.: Высшая школа, 2007 г.-199 с.

2. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Изд. Центр «Академия»; 2010 г.-269 с.

3. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлика с решениями. М.: Высшая школа. 2007 г. 192 с.

4. Артемьева Т.В. и др. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.-336 с.

5. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учебное пособие для вузов/ -М.: Стройиздат,2002. -397 с.

6. Большаков В.А. и др. –Сборник задач по гидравлике. -Киев Вища школа, 1979. -336 с.

Вопросы для самоконтроля

1. Потери напора и давления на трение.

2. Коэф. трения и коэф. сопротивления трения.

3. Гидравлически гладкие трубы.

4. Гидравлически шероховатые трубы.

5. Квадратичная (автомодельная) область гидравлического трения.

6. Зависимость коэффициента трения от режима движения жидкости.

7. Коэффициент трения в ламинарной зоне.

8. Какова общая форма зависимости коэффициента трения от критерия Рейнольдса?

Методика проведения лабораторной работы

1. Заполнить установку (рис 1.) водой, закрыть вентиль 4 и включить насос 1.

2.Вентилем 4 установить максимальный расход воды в экспериментальном трубопроводе.

3. Снять показания дифманометра и измерить расход воды.

4. Ветилем 4 уменьшить расход воды и повторить измерения при новом расходе.

5. Измерить температуру воды, выключить насос и закрыть вентиль 4.

6. Результаты измерений занести в таблицу 1.

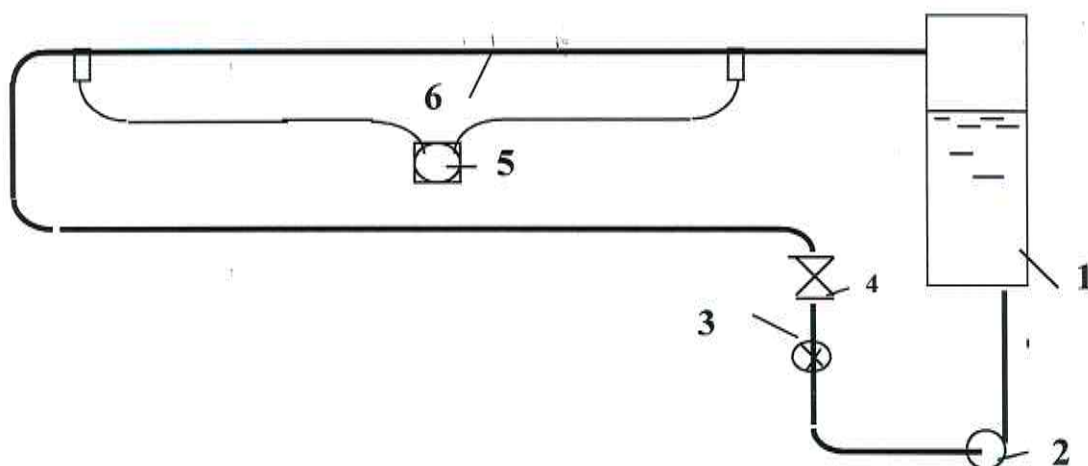


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Выкачивая жидкость из емкости 1, насос 2 создает циркулирующий поток в системе трубопроводов. Регулировка расхода жидкости осуществляется вентилем 4. Для измерения потерь напора на экспериментальном участке 6 используется мембранный дифференциальный манометр 5, подключенный к вторичному электронному прибору. Измерение расхода проводится с помощью водяного счетчика 3 и секундомера.

7. Обработка опытных данных

7.1. Расход $Q=V/\tau$, м³/с.

7.2. Скорость $w=Q/S$, м/с, где $S=0.785 \cdot d^2$; $d=0.05$ м - диаметр трубы.

Опытные и расчетные параметры

Таблица 1

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Числовое значение
1.	Объем	V м ³	
2.	Время	t сек	
3.	Показания дифманометра	H рт.мм.рт.ст.	
4.	Потери напора	$h_{\text{п}}$ м.вод.ст.	
5.	Критерий Рейнольдса	Re	
6.	Опытный коэф. трения		
7.	Теоретический коэф. трения		

Температура $t=$ ____ С⁰. Кинематическая вязкость $\nu=$ ____ м²/с.
Диаметр трубы $d=$ ____ м.

7.3. Критерий Рейнольдса $Re=w \cdot d/\nu$.

7.4. Потери напора $h=0.013245 \cdot h_{\text{рт}}$, м.в.ст.

7.5. Опытный коэффициент гидравлического трения

$$\lambda = \frac{2gdh}{lw^2}, \text{ где } l=4.58 \text{ м. - длина трубопровода.}$$

7.6. Теоретический коэффициент гидравлического трения определяют по одной из формул (2-5).

Общие сведения

При движении реальной жидкости часть ее кинетической энергии расходуется на преодоление гидравлического трения и на вихреобразование при изменении направления или величины средней скорости потока. Потери кинетической энергии восполняются за счет потенциальной энергии давления. В результате чего даже при движении потока по прямолинейным участкам ее гидростатическое давление и гидростатический напор снижаются. Потери напора обычно определяются как доля от динамического напора.

$$h_0 = \sum \xi \cdot \frac{\alpha w^2}{2g}, \text{ м,} \quad (1)$$

где $\sum \xi = \sum \xi_m + \xi_0$ - суммарный коэффициент сопротивлений, представляющий собой сумму местных сопротивлений $\sum \xi_m$ и сопротивления трения по длине трубы $\xi_0 = \lambda \cdot L/d_э$;

λ - коэффициент гидравлического трения;

w - средняя скорость движения потока, м/с;

L - длина трубопровода, м;

$d_э$ - эквивалентный диаметр сечения, м.

Коэффициент гидравлического трения зависит от режима движения и относительной шероховатости стенок трубопровода. Относительная шероховатость представляет собой отношение средней величины выступов шероховатостей стенок (абсолютная шероховатость) ε к эквивалентному диаметру $d_э$, $k = \varepsilon / d_э$. Экспериментальные исследования, проведенные для труб и каналов с искусственной и естественной шероховатостью, показали наличие пяти зон с различным характером зависимости $\lambda = f(\text{Re}, k)$.

Первая зона, зона вязкостного трения охватывает ламинарный режим течения. В этой зоне потери напора зависят линейно от средней скорости $h_{\text{П}} = K \cdot w$. Опытные значения ложатся на прямую линию I, описываемую теоретическим уравнением, полученным для потерь напора в ламинарном потоке

$$\lambda = A/\text{Re} \text{ при } \text{Re} < 2320 - \text{ ламинарная зона,} \quad (2)$$

где A - постоянный коэффициент, зависящий от формы сечения потока. Для потоков круглого сечения $A=64$.

Вторая зона переходная. Она перекрывается первой и третьей зоной и четко выражена на трубах и каналах с искусственной шероховатостью одинаковой высотой выступов.

Третья зона гидравлически гладких труб охватывается переходным режимом течения. В этой зоне высота выступов меньше толщины

ламинарного пограничного слоя и по этой причине наблюдается вязкостное трение, при котором шероховатость не оказывает влияния на коэффициент трения. Как и в первой зоне, опытные точки ложатся на одну линию II, но потери напора в отличие от первой зоны, пропорциональны скорости в степени 1,75, т.е. $h_{II}=K \cdot w^{1,75}$. Границы зоны лежат в пределах $Re = 2320 - 20 \cdot d/(Re^{0,25})$. Для расчета коэффициента трения в этой зоне предложен целый ряд эмпирических зависимостей, в частности формула Бляузиуса

$$\lambda = 0,3164/Re^{0,25} \quad (3)$$

Четвертая зона вполне шероховатых труб находится между линиями II и III. Она наблюдается при турбулентном режиме течения, когда высота выступов больше толщины ламинарного пограничного слоя. Выступы шероховатости, прикрытые ламинарным пограничным слоем в третьей зоне, выходят за пределы ламинарного пограничного слоя и влияют на потери напора. Коэффициент трения теперь зависит от двух параметров: критерия Рейнольдса и относительной шероховатости, а показатель степени в зависимости $h_{II}=K \cdot w^n$ лежит в пределах $n=1,75 \div 2$. Зона располагается в области значения критерия Рейнольдса $Re = 20/(k \cdot Re^{0,25}) \cdot 218/k$.

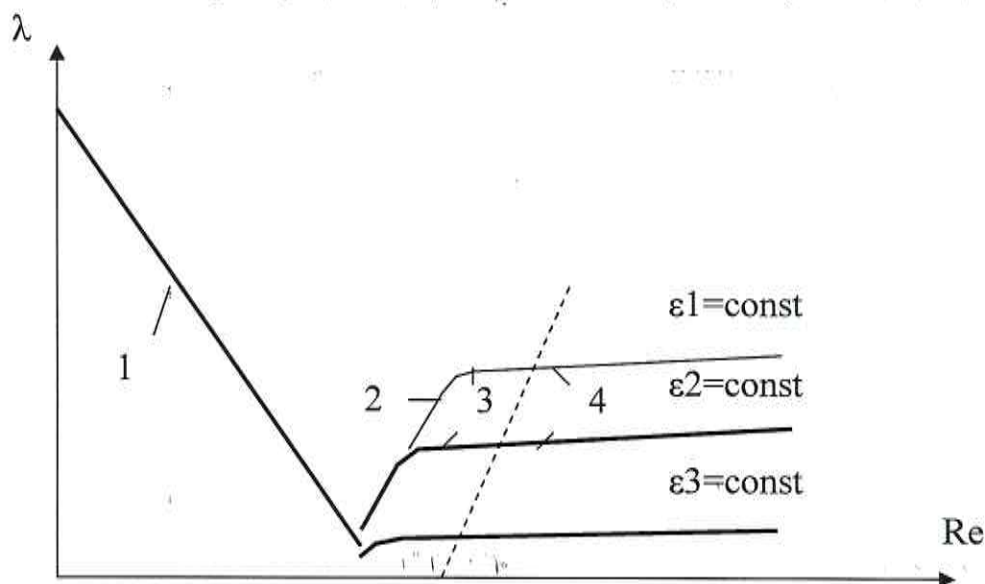


Рис.2. Зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса Re

1- ламинарный режим; 2- переходная зона; 3- гидравлически гладкие трубы (турбулентный режим); 4- шероховатые трубы; 5- автомодельная область

Пятая зона характеризуется областью диаграммы, лежащей справа от линии III. Это зона вполне шероховатого трения, в ней наблюдается срыв пограничного слоя от выступов, и коэффициент трения зависит только от относительной шероховатости. Эту область еще называют квадратичной, т.к. в ней потери напора пропорциональны квадрату средней скорости. В силу того, что здесь исчезает зависимость коэффициента трения от критерия Рейнольдса для пятой зоне используют также термин автомодельной.

Для четвертой и пятой зон обычно применяют эмпирическую формулу Альтшуля, используемую при $Re > 20/(k \cdot Re^{0,25})$

$$\lambda = 0,11[1,64 \cdot \varepsilon/d + 100/Re]^{0,25}.$$

(4)

При $Re > 218/k$ наблюдается квадратичная (или автомодельная) зона членом $100/Re$ можно пренебречь.

Для определения коэффициента трения может быть использована номограмма, приведенная в справочной литературе.

Лабораторная работа № 4

Тема: Изучение гидравлики взвешенного слоя.

Мотивация цели: Изучение этой темы дает необходимые представления о гидравлических процессах происходящих в технологическом оборудовании и служит фундаментом для дальнейшего изучения курса “Процессы и аппараты химических производств”.

Цель самоподготовки: Для проведения данного занятия студент должен знать:

- 1) Условия существования псевдооживленного слоя.
- 2) Что такое первая критическая скорость W , скорость витания $W_{\text{вит}}$, фиктивная скорость W_0 ?
- 3) Основные характеристики слоя зернистого материала.

План проведения лабораторной работы:

контроль исходного уровня знаний
выполнение лабораторной работы
обработка полученных данных
анализ полученных данных
ответ на контрольные вопросы

Источники информации.

1. Кудинов В.А. Гидравлика. М.: Высшая школа, 2007 г.-199 с.
2. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Изд. Центр «Академия»; 2010 г.-269 с.
3. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлика с решениями. М.: Высшая школа. 2007 г. 192 с.
4. Артемьева Т.В. и др. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.-336 с.
5. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учебное пособие для вузов/ -М.: Стройиздат,2002. -397 с.
6. Большаков В.А. и др. –Сборник задач по гидравлике. -Киев Вища школа, 1979. -336 с.

Вопросы для самоконтроля.

Что такое действительная, фиктивная, критическая скорости газа?
Кривая псевдооживления.

Основные характеристики слоя зернистого материала.

Характер изменения характеристик слоя зернистого материала в зависимости от изменения скорости газа.

Параметры влияющие на критические скорости слоя зернистого материала.

Условия существования псевдооживленного слоя.

Почему критическая скорость не зависит от высоты слоя?

Для каких частиц при одинаковом расходе в режиме псевдооживления порозность слоя будет выше (мелких или крупных)?

Критериальные уравнения псевдооживления.

Графические зависимости критерия Лященко от критерия Архимеда.

Контрольные задания.

1. Оформить отчет в установленной форме.

2. Изучить и зарисовать схему экспериментальной установки.

Методика проведения лабораторной работы.

1. Включить питание вентилятора.

2. Поставить шаберы (заслонки) в начальное положение, т.е. задвинуть до упора.

3. Записать показания дифанометра, ротаметра и высоту слоя зернистого материала.

4. Изменяя положение шаберов (заслонок), разводя их, увеличивая таким образом, поток воздуха в экспериментальной трубе, записываем показания дифанометра, ротаметра и высоту слоя зернистого материала.

5. Необходимо произвести 8-10 измерений во всем диапазоне показаний ротаметра, 2-3 измерения в области фильтрации, остальные в режиме псевдооживления.

6. После проведения последнего замера поставить шаберы в начальное положение, отключить тумблер питания.

7. Штангенциркулем измерить диаметр и длину трех гранул материала и записать среднеарифметическое трех измерений.

8. После проведения экспериментов произвести следующие расчеты:

Диаметр шара, равновеликого частицам:

$$d = (3d_r^2 \times \frac{1}{2})^{1/3} = \left(\frac{3d_r^2}{2}\right)^{1/3} \text{ м.}$$

Фактор формы:

$$\Phi = \frac{\pi d^2}{1,57d_r^2 + \pi d_r \cdot 1}$$

Порозность слоя:

$$\varepsilon = \frac{V_\omega - V_r}{V_\omega}, \text{ где}$$

V_ω - общий объем, занимаемый слоем м

V_r - объем занимаемый только твердыми частицами.

Плотность воздуха и кинематическая вязкость выбирается по таблице физических свойств воздуха.

Критерий Архимеда:

$$A_r = \frac{d\rho_0(\rho - \rho_e)g}{\mu_0^2}, \text{ где}$$

ρ - плотность твердых частиц и среды соответственно.
 Действительная скорость

$$W = \frac{W_0}{E}, \text{ где}$$

W_0 -фиктивная скорость (она равна отношению расхода к сечению аппарата)
 Действительный критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{Wd}{\nu}$$

8) Теоретический критерий Рейнольдса для критической скорости

$$Re = \frac{A_r}{1400 + 5,22 \cdot A_r^{0,5}}$$

9) Для режима псевдооживления:

$$Re = \frac{A_r \cdot z_{4,75}}{(18 + 0,6(A_r \cdot z_{4,75})^{0,5}}$$

10) Теоретическую скорость определяют из теоретического критерия Рейнольдса

$$W = \frac{Re\nu}{d}$$

11) Теоретическое и действительное числа псевдооживления определяем по зависимости:

$$K = \frac{W}{W_{дс}}$$

12). Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1

Таблица 1

Наименование параметров	Обозначени е	Численное значение
1.Диаметр частиц	d_r , м	
2.Длина частиц	l_r , м	
3.Масса слоя	m, кг	
4.Диаметр экспериментальной	D, м	

трубы	ρ , кг/м ³	
5. Плотность твердых частиц		

Результаты расчетов занести в таблицу 2.

Таблица 2

Наименование и обозначение параметров	Номер опыта									
1. Показания диф. манометра, м										
2. Высота слоя Н, м										
3. Показания ротаметра, м ³ /с										
4. Фиктивная скорость, м/с										
5. Порозность слоя, ϵ										
6. Критерий Архимеда, A_g										
7. Действительная скорость, м/с										
8. Действительный критерий Рейнольдса, Re										
9. Теоретический критерий Рейнольдса, Re_T										
10. Теоретическая скорость, м/с										

13. В довершение расчетов построить зависимость потерь давления, от фиктивной скорости.

Общие сведения

В химической промышленности ряд процессов, проходящих между газом или жидкостью и твердым зернистым материалом (сушка, адсорбция, обжиг и др.) с целью интенсификации процесса проводят во взвешенном (псевдооживленном) или кипящем слое.

Если через слой зернистого материала, лежащем на распределительной решетке, пропускать оживающий агент (газ или капельную жидкость), то при некоторой скорости агента, называемой критической, весь слой твердых частиц перейдет во взвешенное состояние. При дальнейшем увеличении скорости объем взвешенного слоя возрастает. Такой расширяющийся взвешенный слой, в котором происходит интенсивное перемешивание твердых частиц, во многом напоминает кипящую жидкость, он "течет", принимает форму сосуда, через него пробулькивают пузыри оживающего агента. Поэтому его часто называют кипящим или псевдооживненным. Последующее увеличение скорости оживающего агента ведет к дальнейшему расширению взвешенного слоя. Наконец при скорости, называемой скоростью витания (уноса или второй критической скорости), взвешенный слой разрушается — твердые частицы уносятся из аппарата потоком оживающего агента, осуществляется их пневмотранспорт.

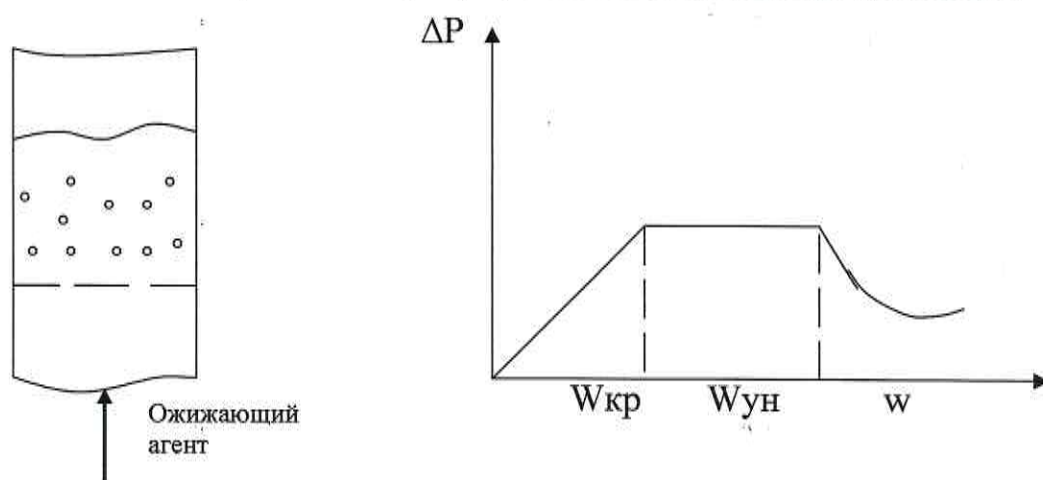


Рис. 1 Схема аппарата псевдооживненного слоя и кривая псевдооживнения.

Слой зернистого материала характеризуется следующими параметрами:

ε - порозность слоя (доля свободного объема).

a - удельная поверхность (площадь 1 м^3 частиц), $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Эквивалентный диаметр каналов $d = 4 \cdot \varepsilon / a$. (1)

$\varphi = W_0 / W = 1 / \Phi^2$ - коэффициент формы.

Φ - фактор формы, равный отношению поверхности равновеликого шара к поверхности частиц

d_c - диаметр шара, равновеликого частицам материала.

Насыпная плотность слоя материала $\rho_H = \rho \Gamma \cdot (\varepsilon - 1)$. (2)

Критерий Рейнольдса для зернистого слоя $Re = W \cdot d / \nu$ (3)

Потеря давления в слое

$R = 3 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \zeta \cdot H \cdot \rho \cdot w^2 / (4 \cdot \varepsilon^3 \cdot \Phi \cdot d)$ (4)

где ζ - коэффициент сопротивления слоя, зависящий от режима течения жидкости.

$$\zeta = 133/Re \text{ для ламинарного течения при } Re < 2 \quad (5)$$

$$\zeta = 2,34 \text{ для автомодельной области при } Re > 7000 \quad (6)$$

$$\zeta = 133/Re + 2,34 \text{ для всех режимов.} \quad (7)$$

Для существования взвешенного слоя должно соблюдаться равенство силы давления слоя на решетку и потери давления ожижающего агента в слое.

$$P_{сл} = G_{сл}/S \quad (8)$$

где S - сечение аппарата, m^2 .

Произведя необходимые математические преобразования получим:

$$150 \cdot (1-\varepsilon) \cdot Re_0 / (a^3 \cdot \Phi^2) + 1,75 \cdot Re_0^2 / (a^3 \cdot \Phi) = Ar \quad (9)$$

где Ar - критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 \rho_c (\rho - \rho_c)}{\mu_c^2} \quad (10)$$

$Ar = g \cdot d^3 \cdot (\rho_T - \rho) / (v^2 \rho)$ или

Решение уравнения (9) для начала псевдооживления (при $\varepsilon = 0,4$ для частиц круглой формы) позволяет найти критическое число Рейнольдса и соответственно теоретическую скорость начала псевдооживления.

$$Re_{кр.} = Ar / (1400 + 5,22 \cdot Ar^{0,5}) \quad (11)$$

Для второй критической скорости (скорости витания или уноса)

$$Re_{в.} = Ar / (18 + 0,575 \cdot Ar^{0,5}) \quad (12)$$

Для определения скорости псевдооживленного слоя, при заданной порозности слоя.

$$Re_{в.} = Ar \cdot \varepsilon^{4,75} / (18 + 0,6 \cdot (Ar \cdot \varepsilon^{4,75})^{0,5}) \quad (13)$$

Отношение скорости псевдооживления к критической скорости называют числом псевдооживления.

$$K = W/W_{кр.} \quad (14)$$

Потеря давления в псевдооживленном слое в интервале скоростей потока от $W_{кр.}$ до $W_{вит.}$ остается постоянной, что достигается постоянством действительной скорости ожижающего агента в слое материала. Фиктивная скорость потока (она равна отношению расхода к сечению аппарата) изменяется, а действительная за счет расширения слоя материала изменяется в пределах от $W_{кр.}$ до $W_{вит.}$. При этом порозность слоя изменяется от $\varepsilon = 0,4$ в начале псевдооживления, до $\varepsilon = 1,0$ при наступлении режима уноса частиц.

Лабораторная работа № 5

Тема: Определение скоростей оседания частиц.

Мотивация цели: Изучение закономерностей обтекания потоком жидкости твердого тела. Определение экспериментальной и теоретической скорости осаждения частиц в жидкости.

Цель самоподготовки: Для проведения работы студент должен знать:

1. Существующие режимы осаждения;
2. Понятие солидарного и свободного осаждения;
3. Критериальные уравнения осаждения.

План проведения лабораторного занятия.

1. Контроль исходного уровня;
2. Выполнение лабораторной работы;
3. Обработка полученных данных;
4. Анализ полученных данных;
5. Ответы на контрольные вопросы.

Источники информации.

1. Кудинов В.А. Гидравлика. М.: Высшая школа, 2007 г.-199 с.
2. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Изд. Центр «Академия»; 2010 г.-269 с.
3. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлика с решениями. М.: Высшая школа. 2007 г. 192 с.
4. Артемьева Т.В. и др. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.-336 с.
5. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учебное пособие для вузов/ -М.: Стройиздат, 2002. -397 с.
6. Большаков В.А. и др. –Сборник задач по гидравлике. -Киев Вища школа, 1979. -336 с.

Вопросы для самоконтроля.

Режимы осаждения.

Солидарное и свободное осаждение.

Определение скорости осаждения методом приближений.

Определение скорости осаждения методом Лященко.

Кинетическая кривая осаждения.

Конструкции отстойников.

Критериальные уравнения осаждения.

Формулы и физический смысл критериев Рейнольдса и Архимеда.

Сила сопротивления при оседании одиночных частиц.

Контрольные задания

1. Оформить отчет в установленной форме.
2. Изучить и зарисовать схему экспериментальной установки.

Методика проведения лабораторной работы.

Измеряют температуру жидкости и размеры исследуемых частиц.

Пинцетом подносят частицу к поверхности жидкости и опускают ее. В момент прохождения частицы верхней отметки включают секундомер. При прохождении частицы нижней отметки секундомер выключают.

Сеткой поднимают частицу со дна жидкости. Затем сетку опускают на дно. Через 2-3 мин. опыт повторяют. Для расчетов используют среднеарифметические, из 2-х измерений. Данные опыта заносят в таблицу 1.

Таблица 1

Размеры частицы, м	d_1	d_2	d_3
Время T, с.			
Температура t, °C			
Вязкость ν м/с ²			
Критерий Рейнольдса Re			
Критерий Архимеда Ar			
Опытная скорость осаднения W_0 , м/сек			
Теоретическая скорость осаднения W м/сек			

Среднекубический диаметр частицы $d = ((d_1^3 + d_2^3 + d_3^3)/3)^{1/3}$, м;

Опытная скорость осаднения $w = L/T$, м/с;

Критерий Архимеда

$$Ar = \frac{gd^3(\rho_T - \rho)}{\nu^2 \rho}$$

Критерий Рейнольдса определяем по одному из уравнений (8-10) в зависимости от режима осаднения, определяемому по численному значению критерия Архимеда.

Теоретическая скорость осаднения $w = Re \cdot d/\nu$

Коэффициент скорости определяем как отношение опытной и теоретической скоростей осаднения $\Phi = w_0/w$.

Опытная установка

Установка состоит из стеклянного цилиндра (1), заполненного жидкостью. Для измерения скорости осаднения частиц используется секундомер, с помощью которого определяется время прохождения частицы между

верхней (2) и нижней (3) отметки цилиндра. Для извлечения осевших частиц используется сетка (4), опускаемая на дно сосуда перед проведением опытов.

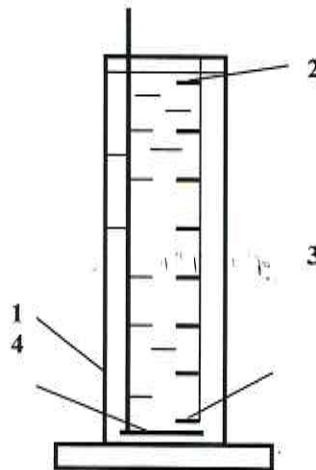


Рис.1 Схема лабораторной установки.

Общие сведения.

В промышленности часто встречаются гидромеханические процессы, в которых наблюдается движение тел в жидкостях или газах (осаждение твердых частиц, перемешивание жидких сред, псевдооживление и др.). Это так называемая внешняя задача гидродинамики, заключающаяся в изучении закономерностей обтекания потоком жидкости твердого тела.

Жидкая среда оказывает сопротивление движущемуся телу, величина которого зависит от свойств среды, размеров и формы тела, свойств тела. Существенное влияние на силу сопротивления оказывает также режим движения тела.

Движение тела в среде может происходить при ламинарном, переходном и автомодельном режимах. При ламинарном режиме среда плавно обтекает тело и сопротивление связано преимущественно с преодолением сил гидравлического трения. С ростом скорости, влияние сил инерции возрастает и в критический момент в кормовой части движущегося тела возникает зона турбулизации. К силе сопротивления трения добавляется сила лобового сопротивления, величина которого с ростом критерия Рейнольдса увеличивается и в некоторый момент становится преобладающей. Наступает автомодельный режим движения.

Коэффициент сопротивления для ламинарной зоны обтекания определяется по закону Стокса при $Re < 2$ $\zeta = 24/Re$ (1)

Для переходного режима при $Re = 2-500$ $\zeta = 18,5/Re^{0,6}$ (2)

Для автомодельной области при $Re = 500-200000$ $\zeta = 0,44$ (3)

Указанные зависимости относятся к шаровым телам. При движении тел нешарообразной формы коэффициент сопротивления зависит от формы тела $\Phi = F_{ш}/F$, в котором $F_{ш}$ и F — поверхность равнообъемных шара и тела. В

качестве определяющего размера для тел произвольной формы используется эквивалентный диаметр, определяемый как диаметр равнообъемного шара. При установившемся осаждении в поле сил тяжести сила сопротивления будет равна силе тяжести минус сила выталкивания. Учитывая, что сила сопротивления равна произведению коэффициента сопротивления, поперечного сечения частицы и динамическому напору, получим уравнение для определения скорости осаждения:

$$W_0 = (4g \times d(\rho_T - \rho) / (3 \times \zeta \times \rho))^{0.5} \quad (4)$$

После подстановки в уравнение (4) коэффициента трения из выражений (1-3) можно получить различные уравнения для определения скорости осаждения. Использование таких уравнений в практических задачах потребует применения метода последовательных приближений. Более удобным для практического определения скорости осаждения является метод Лященко. Подставим в выражение (4) значение скорости осаждения, выраженной из числа Рейнольдса, возведя в квадрат обе части уравнения; после несложных преобразований получим:

$$Re^2 = \frac{4d^3 g(\rho_c - \rho)}{3\rho v^2} \quad (5)$$

В правой части последнего выражения выделим критерий Архимеда.

$$Ar = \frac{gd(\rho_n - \rho)}{(\rho v^2)} \quad (6)$$

Тогда критериальное уравнение для определения скорости осаждения примет вид:

$$Re^2 \times \zeta = 4/3 \times Ar \quad (7)$$

Подставляя значения коэффициента сопротивлений для различных режимов осаждения частиц и критические значения числа Рейнольдса получим:

$$\text{Для ламинарного режима при } Ar < 36 \quad Re = Ar/18 \quad (8)$$

$$\text{Для переходного режима при } Ar = 36-83000 \quad Re = 0,152 \times Ar^{0,715} \quad (9)$$

$$\text{Для автомодельной области при } Ar > 83000 \quad Re = 1,74 \times (Ar)^{0,5} \quad (10)$$

Если режим осаждения не известен, то для определения скорости осаждения можно воспользоваться единой интерполяционной формулой:

$$Re = Ar / (18 + 0,575 \times Ar^{0,5}) \quad (11)$$

Последнее уравнение пригодно для определения скорости осаждения частиц шаровой формы при их свободном осаждении частиц. Для частиц произвольной формы скорость осаждения ниже и ее уменьшение учитывается эмпирическим коэффициентом формы:

$$W = W_\phi \quad (12)$$

Лабораторная работа №6

ТЕМА: Определение сопротивления фильтрующей перегородки

Мотивация цели: состоит в экспериментальном определении сопротивления и удельного сопротивления фильтрующей перегородки.

Цель самоподготовки: Для проведения работы студент должен знать:

1. Виды фильтрации.
2. Основное уравнение фильтрации.
3. Удельную производительность фильтра.

План проведения лабораторного занятия.

1. Контроль исходного уровня;
2. Выполнение лабораторной работы;
3. Обработка полученных данных;
4. Анализ полученных данных;
5. Ответы на контрольные вопросы.

Источники информации.

1. Кудинов В.А. Гидравлика. М.: Высшая школа, 2007 г.-199 с.
2. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Изд. Центр «Академия»; 2010 г.-269 с.
3. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлика с решениями. М.: Высшая школа. 2007 г. 192 с.
4. Артемьева Т.В. и др. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.-336 с.
5. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учебное пособие для вузов/ -М.: Стройиздат,2002. -397 с.
6. Большаков В.А. и др. –Сборник задач по гидравлике. -Киев Вища школа, 1979. -336 с.

Контрольные задания

1. Оформить отчет в установленной форме.
2. Изучить и зарисовать схему экспериментальной установки.

Вопросы для самоконтроля.

1. Сущность фильтрации с образованием осадка, с закупориванием пор, осветления и сгущения.
2. Виды фильтрации.
3. Основное уравнение фильтрации.
4. Уравнение фильтрации для различных видов фильтрации.
5. Конструкции фильтров.
6. Вспомогательные материалы фильтрации.

Методика проведения лабораторной работы.

1. Заполняем бюретку водой и закрываем пробкой ее горловину (рис. 1).
2. Опускаем узким концом бюретку в воронку нутч-фильтра и укрепляем ее в наклонном положении в штативе.

3. После появления фильтрата в мерном цилиндре измеряем расход фильтрата.
4. Измеряем напор воды в фильтре (высота от нижнего уровня перегородки до уровня воды в фильтре).
5. Бюретку вынуть из штатива и вылить из нее воду.
6. Измерить температуру фильтрата и диаметр фильтрующей перегородки.
7. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица

Объем V, мл	Время τ , с	Темп. t, $^{\circ}\text{C}$	Вязкость ν , $\text{м}^2/\text{с}$	Перепад давлений ∇P , мм в. ст.	Перегорodka		Скорость фильтра W, м/с	Сопротив. перегородки	
					Диаметр	толщина		общ. Rф лс	уд. го л/м ²

7.1 Площадь фильтрации $F = \pi \times r^2 = 0,785 \times d^2$, м^2 ;

7.2 Скорость фильтрации $W = V / (\tau \times F)$, м/с;

7.3 Вязкость воды выбираем по справочнику в зависимости от ее температуры;

7.4 Сопротивление фильтра $R = \nabla P / (W \times \mu)$, л/м;

7.5 Удельное сопротивление фильтра $r_0 = R / H$, л/м².

Опытная установка

Установка включает в себя нутч-фильтр (1) с фильтрующей перегородкой (2), выполненной из солнечных гранул стекла. Подача воды осуществляется из герметической бюретки (3). Фильтрат собирается в мерном цилиндре (4).

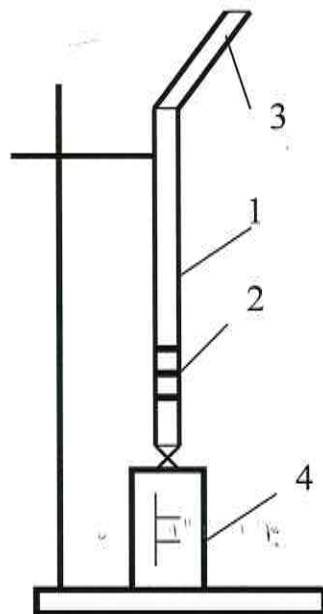


Рис.1 Схема экспериментальной установки

Общие сведения.

Процесс фильтрования, заключающийся в пропускании суспензии (или пыли) через пористую перегородку, широко используется, широко используется для разделения гетерогенных систем. Простейший фильтр состоит из сосуда, разделенного пористой перегородкой на две части. В верхнюю часть заливается суспензия, в нижней – собирается фильтрат. Между верхней и нижней частями сосуда создается перепад давлений, под действием которого жидкость проходит через поры перегородки, а осадок задерживается на фильтрующей перегородке. Этот процесс называется *фильтрацией с образованием осадка*. Если частицы твердой фазы задерживаются не на перегородке, а в ее порах, то наблюдается *фильтрация с закупориванием пор*.

В зависимости от способа создания перепада давления могут наблюдаться следующие фильтрации.

При постоянной разности давлений. Перепад давлений создается сжатым газом, подаваемым в верхнюю часть сосуда или разряжением, создаваемым под фильтрующей перегородкой. При образовании осадка по ходу процесса увеличивается его толщина и сопротивление. Поэтому при постоянной разности давлений скорость процесса с течением времени снижается.

При постоянной скорости фильтрования. Перепад давлений создается объемным насосом, производительность, которого не зависит от создаваемого напора. Постоянство скорости фильтрации при образовании осадка поддерживается ростом разности давлений.

При постоянных скорости фильтрации и перепаде давлений. Этот вид фильтрации наблюдается при осветлении низко концентрированных суспензий (например, при осветлении воды в системах водоснабжения), когда количество осадка незначительно, или при проверке несжимаемых осадков.

Скорость процесса пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна его сопротивлению. Так как при фильтрации размер пор и скорость движения по ним жидкости невелики, то фильтрование идет в ламинарной области. Скорость движения жидкости по капиллярам пропорциональна перепаду давлений и обратно пропорциональна вязкости и гидравлическому сопротивлению. При фильтрации перепад давлений и сопротивление осадка в общем случае изменяются. Поэтому переменную скорость фильтрации надо выражать в дифференциальной форме. Таким образом, уравнение фильтрации будет иметь вид:

$$W = dv / (F \times d\tau) = \nabla P / \mu(R_0 + R_\phi) = \frac{\nabla P}{\mu \left(r_0 \frac{V}{F} x + R_\phi \right)}, \quad \text{м/с} \quad (1)$$

где V – объем фильтрата, м^3 ;

F – поверхность фильтрования, м^2 ;
 ∇P – перепад давлений, н/м^2 ;
 μ – динамическая вязкость жидкой части суспензии, $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$;
 R_0, R_f – сопротивление осадка и фильтрующей перегородки, $1/\text{м}$;
 r_0 – удельное сопротивление осадка, $1/\text{м}^2$;
 x – отношение объема осадка к объему фильтрата.

Проинтегрируем уравнение фильтрации при постоянном перепаде давления в пределах от 0 до V ; и от 0 до τ .

$$\int_0^V \mu \left(r_0 x \frac{V}{F} + R_0 \right) dV = \int_0^\tau \nabla P F d\tau \quad (2)$$

Все величины, входящие в уравнение (2), за исключением V и τ постоянны.

$$\mu r_0 x \frac{V^2}{2F} + \mu R_0 V = \nabla P F \tau \quad (3)$$

После деления обеих частей последнего уравнения на $\mu r_0 x \frac{V^2}{2F}$, получим уравнение фильтрации при постоянном давлении.

$$V^2 + 2R_0 F \frac{V}{r_0 x} - 2\tau \nabla P \frac{F^2}{\mu r_0 x} = 0 \quad (4)$$

Последнее уравнение позволяет определить количество фильтрата в зависимости от времени фильтрации.

Для постоянной скорости фильтрации производную dV/dt можно заменить отношением V/τ , тогда уравнение фильтрации (1) запишется следующим образом:

$$\frac{V}{F\tau} = \frac{\nabla P}{\mu \left(r_0 \frac{V}{F} x + R_0 \right)}, \text{ м/с} \quad (5)$$

После несложных преобразований получим уравнение фильтрации при постоянной скорости:

$$\nabla P = \mu r_0 x W^2 + \mu R_0 W, \text{ н/м}^2 \quad (6)$$

Для постоянной скорости фильтрации при постоянном перепаде давлений из уравнения фильтрации (1) получаем:

$$W = V / (F \times \tau) = \nabla P / (\mu \times (r_0 \times H_0 \times R_\phi)), \text{ м/с} \quad (7)$$

Для начала фильтрации или осветления жидкости при ее фильтрации через перегородку большой толщины (например, слой зернистого материала) сопротивлением фильтра можно пренебречь. Уравнение (7) примет вид:

$$W = V / (F \times \tau) = \nabla P / (\mu \times R_\phi) = \nabla P / (\mu \times r_\phi \times H_\phi), \text{ м/с} \quad (8)$$

где r_ϕ - удельное сопротивление фильтрующей перегородки $1/\text{м}^2$;

H_ϕ - толщина фильтрующей перегородки.