

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Институт прикладной математики, информатики, био- и нанотехнологий

Кафедра химических технологий

Пикалов Евгений Сергеевич

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ
И ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии
и защиты окружающей среды» для студентов ВлГУ,
обучающихся по направлению 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в
химической технологии нефтехимии и биотехнологии

Владимир – 2015 г.

Данные методические указания включают рекомендации по подготовке к выполнению и защите лабораторных работ по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии и защиты окружающей среды» для студентов направления 18.03.02. «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» ВлГУ.

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 18.03.02. «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», рабочей программы дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии и защиты окружающей среды».

Рассмотрены и одобрены на
заседании УМК направления
18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»
Протокол №9 от 01.04.2015 г.

Рукописный фонд кафедры ХТ ВлГУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

4-Й СЕМЕСТР.....	4
Лабораторная работа 1. Режимы движения жидкости.....	4
Лабораторная работа 2. Гидравлические сопротивления.....	9
Лабораторная работа 3. Уравнение Бернулли.....	15
Лабораторная работа 4. Испытание расходомера типа трубы Вентури.....	21
Лабораторная работа 5. Истечение жидкости из отверстий и насадок.....	26
Лабораторная работа 6. Изучение процесса теплопередачи.....	31
Лабораторная работа 7. Исследование фракционной перегонки.....	36
5-Й СЕМЕСТР.....	42
Лабораторная работа 1. Изучение процесса отстаивания сточных вод.....	42
Лабораторная работа 2. Изучение интенсификации отстаивания сточных вод.....	46
Лабораторная работа 3. Изучение процесса фильтрации сточных вод.....	51
Лабораторная работа 4. Изучение работы циклона.....	57
Лабораторная работа 5. Изучение процесса адсорбции сточных вод.....	61
Лабораторная работа 6. Изучение процесса химической нейтрализации сточных вод....	65
Лабораторная работа 7. Изучение процесса электролиза сточных вод.....	70

4-Й СЕМЕСТР

Лабораторная работа 1. Режимы движения жидкости

Цель выполнения лабораторной работы

1. Выявить зависимость расхода жидкости от режима ее течения;
2. Определить гидравлические параметры течения жидкости при различных значениях напора.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

№ режима	№ за- мера	t, °C	τ , с	$\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	ρ , кг/м ³	$V_c \cdot 10^{-3}$, м ³ /с	$w \cdot 10^{-3}$, м/с	Re
1	1							
	2							
...	...							

Примечание: пояснения к обозначениям даны в методике обработки результатов эксперимента

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Данная работа проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 1.

В случае, если преподаватель задал установление режимов течения, то перед началом эксперимента необходимо приготовить раствор подкрашивающей жидкости. Для этого в воде разводятся чернила в концентрации, которую задает преподаватель. Полученный раствор заливают в специальный бак 3.

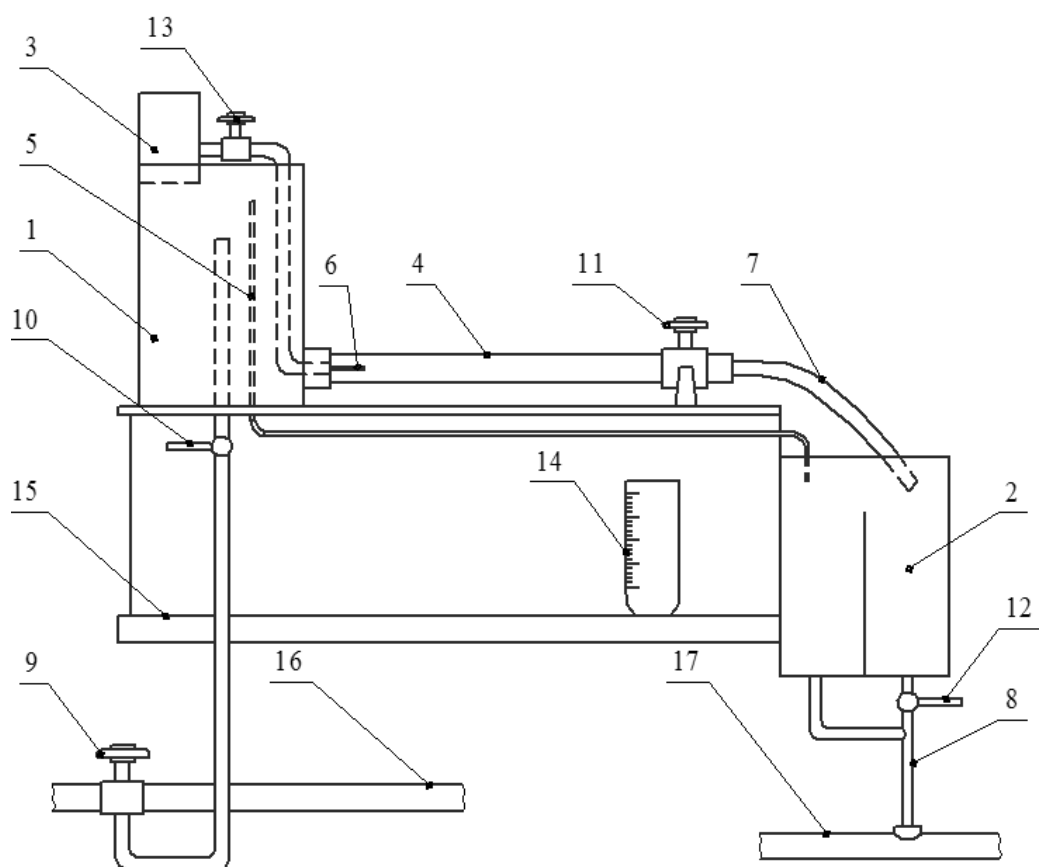


Рис. 1. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Режимы движения жидкости»: 1 – напорный бак; 2 – сливной бак; 3 – бак для подкрашивающей жидкости; 4 – переточная стеклянная трубка; 5 – переливная трубка; 6 – трубка подачи подкрашивающей жидкости; 7 – шланг слива в сливной бак; 8 – шланг слива в водопроводную систему; 9-13 – вентили; 14 – мерная емкость; 15 – лабораторный стол; 16 – водопровод; 17 - канализация

Также перед началом эксперимента проверяется положение сливных шлангов: один из них (7) должен находиться в сливном баке, а другой (8) в сливе в канализацию. Эксперимент начинается с подачи воды в напорный бак 1 путем открытия вентилей 9 и 10. По мере заполнения бака 1 проверяется герметичность узлов установке и в случае обнаружения течи о ней сообщается преподавателю. В этом случае выполнение работы прекращается, а течь устраняется.

Если установка герметична, то заполнение напорного бака 1 продолжают. При этом после полного заполнения стеклянной трубки 4 открываются вентили 11 и 12. Причем вентиль 11 открывается в соответствии с заданием на выполнение лабораторной работы.

После этого напорный бак 1 заполняется до уровня, превышающего диаметр трубки 5 на 1-2 мм. Это состояние называется «перелив» и должно поддерживаться во время проведения всей лабораторной работы. За соблюдением «перелива» рекомендуется наблюдать двум

студентам: один из них визуально фиксирует высоту подъема воды в напорном баке 1, а второй при необходимости и указаниям первого студента меняет положения вентиля 9 или вентиля 10.

Если преподаватель задал установить режим течения, то после установления «перелива» необходимо открыть вентиль 13 и начать подачу подкрашивающей жидкости в стеклянную трубку 4. После этого задается режим течения за счет изменения положения вентиля 9 или вентиля 10 с сохранением состояния «перелива». При этом фиксируется траектория течения подкрашивающей жидкости. Типовые схемы траектории течения подкрашивающей жидкости изображены на рис. 2.

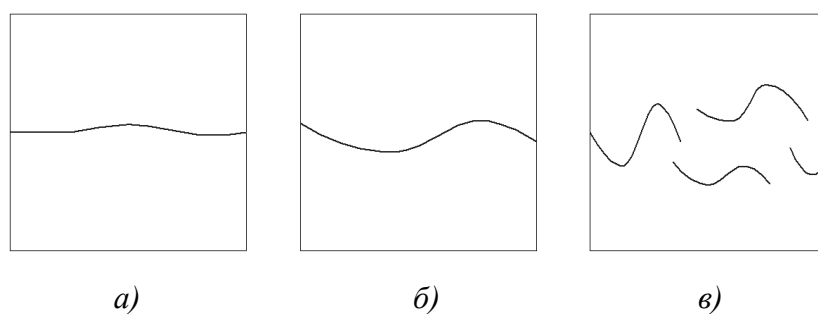


Рис. 2. Типовые схемы траектории течения подкрашивающей жидкости: а) ламинарный режим; б) переходный режим; в) турбулентный режим

По достижении заданного режима течения ожидают 2 – 3 минуты для стабилизации потока и переходят к измерениям. В случае, если преподаватель не задавал установить режим течения, сразу после установления «перелива» ожидают стабилизации потока и переходят к измерениям.

Измерения проводят при помощи мерной емкости 14 и секундомера. Для этого из числа выполняющих работу выбирается студент, который будет делать записи результатов эксперимента и работать с секундомером. По его команде другой студент быстро перекидывает конец сливного шланга 7 в мерную емкость 14, одновременно с этим включают секундомер. Фиксируется время заполнения мерной емкости до уровня, заданного преподавателем. После достижения уровня секундомер останавливают, конец сливного шланга 7 перекидывают в сливной бак 2. Затем в мерную емкость 14 опускают термометр и оставляют там на 2 – 3 мин для большей точности измерения. Затем термометр извлекают, а воду из мерной емкости 14 выливают в сливной бак 2.

Во время выполнения замеров следят за сохранением «перелива».

После этого еще дважды измеряют время заполнения мерной емкости 14. Температуру при этом больше измерять не нужно. В случае, если время заполнения расходится больше чем на 1,5 секунды замер повторяют.

По достижении трех близких по значению результатов вентиль 11 открывают на следующее заданное преподавателем значение или устанавливают следующий заданным им режим течения по траектории течения подкрашивающей жидкости. При новом режиме вновь измеряют время заполнения мерной емкости 14 до получения трех близких по значению результатов. При этом в первом замере второго режима вновь определяют температуру воды в мерной емкости 14.

Аналогично проводят установку третьего режима, определяют температуру в мерной емкости 14 и получают три близких по значению времени заполнения.

После этого подачу подкрашивающей жидкости, в случае если она была нужна для выполнения работы, прекращают. Затем вентили 9 и 10 перекрывают, а вентили 11 и 12 открывают на полную до полного истечения жидкости из узлов установки. После этого вентили 11 и 12 также перекрывают. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Определяют расход воды для каждого режима по трем измерениям при нем:

$$V_c = \frac{3 \cdot V}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V_c – секундный объемный расход; V – заданный объем заполнения мерной емкости, м^3 ; τ – время заполнения заданного объема мерной емкости, с.

Примечание: при расчетах необходимо переводить величины в размерности, принятые СИ. Например, в данном пункте нужно перевести объем мерной емкости из литров в кубические метры.

2. Рассчитывают площадь поперечного сечения стеклянной трубки F (поз. 4 на рис. 1):

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2,$$

где d – внутренний диаметр стеклянной трубки, равный 24,3 мм.

3. Определяют среднюю скорость течения жидкости для каждого режима течения:

$$w = \frac{V_c}{F}, \text{ м/с}$$

4. Рассчитывают свойства воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы:

температура t , °C	0	10	20	30	40	50
плотность ρ , кг/м^3	1000	1000	998	996	992	988
вязкость $\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования. Например, плотность будет определяться по формуле:

$$\rho = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1}(t - t_1),$$

где t_1 – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному; t_2 – значение температуры, ближайшее большее к измеренному; t – измеренное значение температуры; ρ_1, ρ_2 – значения плотности воды при температурах t_1, t_2 .

5. Рассчитывают значение критерия Рейнольдса для каждого режима течения:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

6. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Объем заполнения мерной емкости 14, л	Степень открытия вентиля 11, повороты	Получение режимов
1	0,5	1; 3; 5	-
2	0,75	2; 4; 6	-
3	1,0	1; 4; 6	-
4	0,5	-	+
5	0,75	-	+
6	1,0	-	+

Примечание: получение режимов подразумевает установку ламинарного, переходного и турбулентного режимов в соответствии с рис. 2 и проведение замеров по ним

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;

7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте краткую характеристику каждому из режимов течения жидкости. Какие значения критерия Рейнольдса им соответствуют?
2. Что такое критерий Рейнольдса? По какой формуле он определяется?
3. Опишите методику определения режима течения жидкости.
4. Какая величина оказывает наибольшее влияние на режим течения? Почему?
5. Какие силы преобладают при ламинарном течении жидкости?
6. Какие силы преобладают при турбулентном течении жидкости?
7. От каких параметров зависит режим течения жидкости?
8. Как определить среднюю по сечению скорость потока?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Сайритдинов С.Ш. Основы гидравлики: учебник для вузов - М.: Издательство АСВ, 2014. - 386 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300263.html>);
3. Аракелян С.М. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией: Учеб. пособие – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – 99 с (наличие в библиотеке ВлГУ и доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4549/1/01506.pdf>);
4. Самарин О.Д. Гидравлические расчеты инженерных систем: Справоч. пособие. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. - 112 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300140.html>).

Лабораторная работа 2. Гидравлические сопротивления

Цель выполнения лабораторной работы

1. Определить теоретические и экспериментальные потери напора и потери давления при различных начальных значениях напора жидкости;
2. Определить теоретический и экспериментальный коэффициенты трения при различных начальных значениях напора жидкости

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Δh , мм	№ за- ме- ра	t, °C	τ , с	V_c $\cdot 10^{-3}$, м ³ /с	V_c^{cp} $\cdot 10^{-3}$, м ³ /с	K_v , %	w $\cdot 10^{-3}$, м/с	μ $\cdot 10^{-6}$, Па·с	ρ , кг/м ³	Re	λ_p	λ_ε	Δp_p	Δp_ε
	1													
	2													
	...													

Примечание: пояснения к обозначениям даны в методике обработки результатов эксперимента

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Данная работы проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 3.

Перед началом эксперимента проверяется положение сливного шланга 6: он должен быть направлен на слив в канализацию. Также проверяется равенство уровней жидкости в трубках дифференциального манометра 5. В случае разности показаний о нем сообщается преподавателю, после чего неисправность устраняется.

Эксперимент начинается с подачи воды в трубопровод 2 путем открытия вентиля 1. Установка проверяется на герметичность. В случае обнаружения течи о ней сообщается преподавателю, после чего неисправность устраняется.

Если установка герметична, то при помощи вентиля 1 устанавливается заданная преподавателем разность в показаниях на дифференциальном манометре 5. Для этого из числа студентов, выполняющих работу, выбирается один студент, который будет следить за уровнем жидкости в трубках дифференциального манометра, а второй студент по указаниям первого будет регулировать подачу воды вентилем 1. Уровень воды в трубках может быть любым по

значениям, задача студентов, чтобы при нахождении разницы между ними получилось заданное преподавателем число.

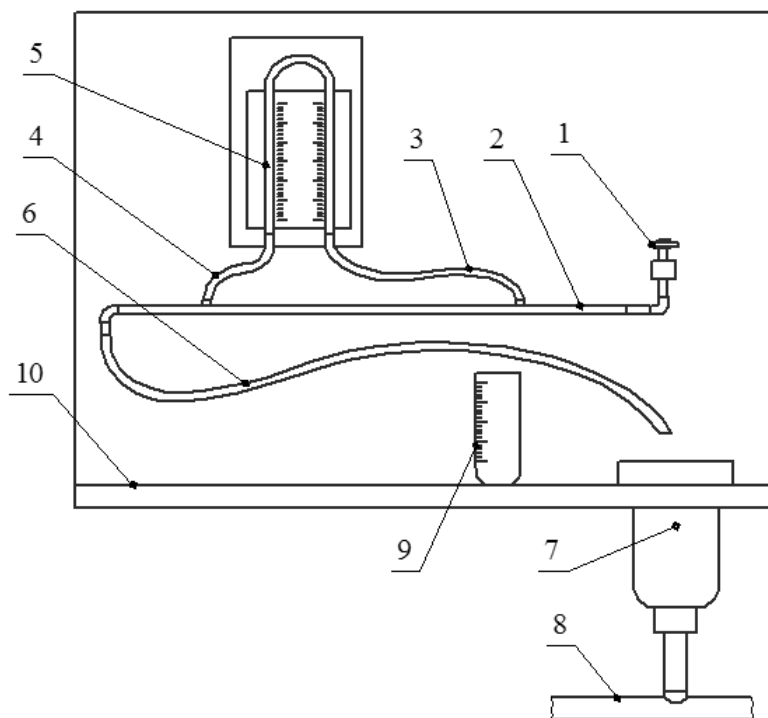


Рис. 3. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Гидравлические сопротивления»: 1 – вентиль подачи воды; 2 – исследуемый трубопровод; 3,4 – шланги; 5 – дифференциальный манометр; 6 – сливной шланг; 7 – слив; 8 – канализация; 9 – мерная емкость; 10 – лабораторный стол

После установления нужной разности показаний необходимо подождать 2 – 3 мин для стабилизации потока. После этого один из студентов перебрасывает конец сливного шланга 6 в мерную емкость 9. Одновременно студент, ведущий записи экспериментальных данных, запускает секундомер и фиксирует время заполнения заданного преподавателем объема. При выполнении замера необходимо соблюдение заданной разности в показаниях трубок дифференциального манометра. После заполнения мерной емкости 9 конец сливного шланга вновь перебрасывается на слив 7. После этого в воду, находящуюся в мерной емкости, опускается термометр и удерживается в ней в течении 2 – 3 минут для точности показаний.

После измерения температуры термометр извлекается, а вода из мерной емкости 9 выливается в слив 7. Затем еще дважды измеряется время заполнения мерной емкости, при этом температуру повторно измерять не нужно. Показания замеров времени должны различаться не больше, чем на 1 сек. В ином случае замеры повторяют до получения трех близких по значениям результатов времени заполнения.

Затем при помощи вентиля 1 выставляется следующая заданная преподавателем разность показаний дифференциального манометра 5. При ней также добиваются трех близких значений времени заполнения мерной емкости 9, а при первом ее заполнении вновь измеряется температура воды. Аналогично выставляется третья заданная разность показаний дифференциального манометра 5 и проводятся измерения времени заполнения и температуры.

По завершении всех измерений вентиль 1 перекрывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Определяют расход жидкости при каждом замере:

$$V_c = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V_c – секундный объемный расход; V – заданный объем заполнения мерной емкости, м^3 ; τ – время заполнения заданного объема мерной емкости, с.

2. Определяют средний расход жидкости при каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$V_c^{cp} = \frac{V_{c1} + V_{c2} + V_{c3}}{3}, \text{ м}^3/\text{с},$$

3. Рассчитывают коэффициент вариации для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$K_v = \frac{100\%}{V_c^{cp}} \sqrt{\frac{(V_{c1} - V_c^{cp}) + (V_{c2} - V_c^{cp}) + (V_{c3} - V_c^{cp})}{2}}$$

При величине $K_v \geq 5\%$ замеры для этой разности показаний в трубках дифференциального манометра необходимо провести повторно.

4. Рассчитывают площадь поперечного трубопровода F (поз. 2 на рис. 3):

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2,$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, равный 16 мм.

5. Определяют среднюю скорость течения жидкости для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$w = \frac{V_c}{F}, \text{ м/с}$$

6. Рассчитывают свойства воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы:

температура t , °С	0	10	20	30	40	50
плотность ρ , кг/м^3	1000	1000	998	996	992	988
вязкость $\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования. Например, плотность будет определяться по формуле:

$$\rho = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где t_1 – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному; t_2 – значение температуры, ближайшее большее к измеренному; t – измеренное значение температуры; ρ_1, ρ_2 – значения плотности воды при температурах t_1, t_2 .

7. Рассчитывают значение критерия Рейнольдса для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

По значениям Re определяют режимы течения.

8. Определяют экспериментальное значение коэффициента трения для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$\lambda_{\text{эксп}} = \frac{2 \cdot g \cdot h_n}{L \cdot w^2},$$

где h_n – потери напора, равные разности показаний в трубках дифференциального манометра Δh ; L – расстояние между точками замера напора в трубопроводе, равное 1 м.

9. В зависимости от полученных режимов течения определяют расчетное значение коэффициента трения по одной из следующих зависимостей для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

При ламинарном режиме коэффициент трения определяется по формуле:

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

- при соблюдении неравенства $2320 < Re < 10/\varepsilon$:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$$

- при соблюдении неравенства $10/\varepsilon < Re < 560/\varepsilon$:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\varepsilon + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$$

- при соблюдении неравенства $Re > 560/\varepsilon$:

$$\lambda = 0,11 \cdot \varepsilon^{0,25}$$

В этих формулах ε – относительная шероховатость стенок трубопровода, равная:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d},$$

где Δ – абсолютная шероховатость стенок, принимаемая равной 0,15 мм, как для стальных труб, бывших в эксплуатации и с незначительной коррозией.

10. Рассчитывают потери давления для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

- теоретические потери давления:

$$\Delta p_p = \rho \cdot g \cdot h_p$$

- экспериментальные потери давления:

$$\Delta p_3 = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

10. Строят графики зависимостей $\lambda = f(Re)$ и $\Delta p = f(Re)$ для экспериментальных и расчетных значений коэффициента трения.

11. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Разность уровня жидкости в трубках дифференциального манометра, см	Объем заполнения мерной емкости, л
1	2	0,5
2	4	0,75
3	6	1,0
4	8	0,5
5	10	0,75
6	12	1,0

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;

7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит потерянный напор? Какой из них по Вашему мнению оказывает наибольшее влияние?
2. От каких параметров зависит потерянное давление? Какой из них по Вашему мнению оказывает наибольшее влияние?
3. Что такое объемный расход жидкости? Как он определяется?
4. От чего зависит коэффициент трения?
5. Что является причиной возникновения потерь напора и давления?
6. Каким образом можно снизить потери напора и давления?
7. Опишите и объясните взаимосвязь между коэффициентом трения и режимами движения жидкости.
8. Что такое местные гидравлические сопротивления и как они определяются?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Сайритдинов С.Ш. Основы гидравлики: учебник для вузов - М.: Издательство АСВ, 2014. - 386 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300263.html>);
3. Аракелян С.М. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией: Учеб. пособие – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – 99 с (наличие в библиотеке ВлГУ и доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4549/1/01506.pdf>);
4. Самарин О.Д. Гидравлические расчеты инженерных систем: Справоч. пособие. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. - 112 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300140.html>).

Лабораторная работа 3. Уравнение Бернулли

Цель выполнения лабораторной работы

1. Определение статического, динамического и потерянного напора при движении жидкости по наклонному трубопроводу, имеющему участки различного диаметра;

2. Изучение влияния начального напора на величины статического, динамического и потеряннного напоров.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Уровень воды в напорном баке, см	№ за-мера	Показания пьезометрических трубок (Р) и трубок Пито (Е)							
		Е ₁	Р ₁	Р ₂	Е ₃	Р ₃	Е ₄	Р ₄	Р ₅
	1								
	2								
	...								

Примечание: показатели пьезометрических трубок соответствуют статическому напору, а трубок Пито – сумме статического и динамического напоров.

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студентам не допускаются к выполнению работы.

Данная работы проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 4.

Перед началом эксперимента проверяется, чтобы конец подводящего шланга 11 был закреплен в напорном баке 1, а шланг из сливного бака 2 подсоединен к канализации 12. Также необходимо, чтобы показания уровнемера и мерных трубок находились на минимальных значениях и на одном уровне. В ином случае об этом сообщается преподавателю и неисправность устраняется.

Затем из числа студентов, выполняющих работу, выбирается один, который будет отвечать за подачу воды в напорный бак 1 при помощи вентиля 9 и следить за показаниями уровнемера 5. Включается подача воды и по мере увеличения напора установка проверяется на герметичность. В случае обнаружения течи о ней сообщается преподавателю и неисправность устраняется.

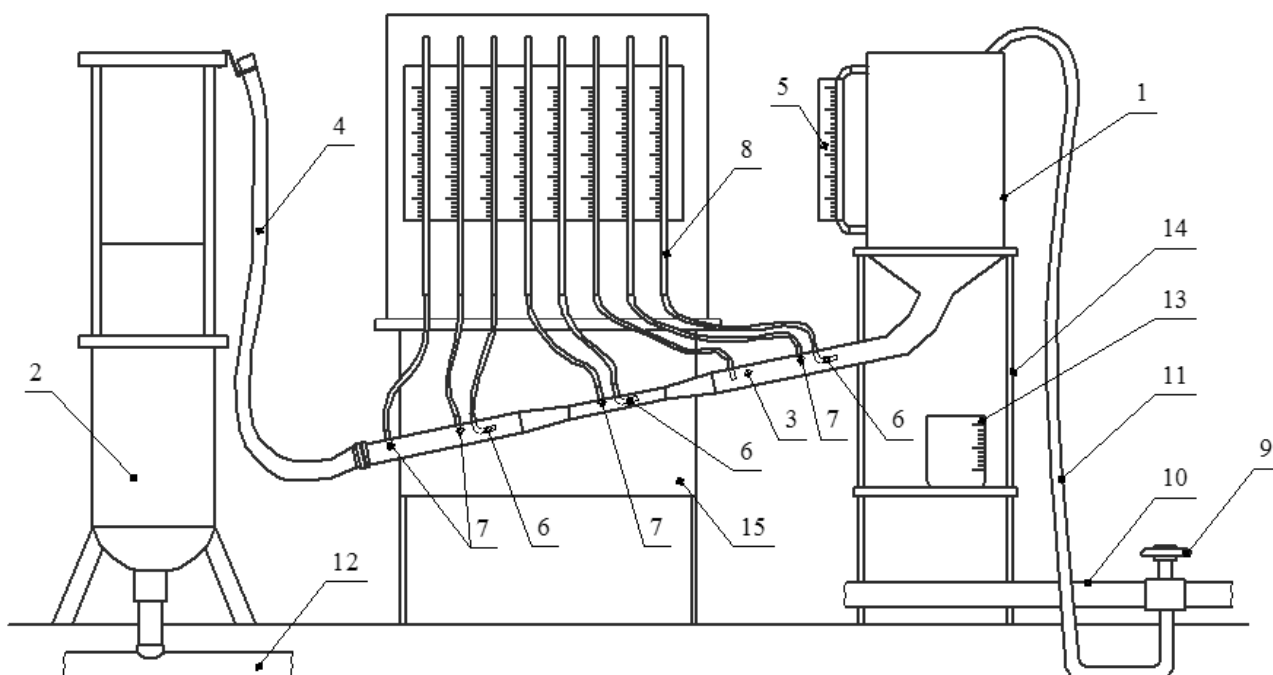


Рис. 4. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Уравнение Бернулли»:

- 1 – напорный бак; 2 – сливной бак; 3 – труба переменного сечения;
 4 – сливной шланг; 5 – уровнемер; 6 – трубка Пито; 7 – пьезометр;
 8 – мерные трубки; 9 – вентиль; 10 – водопровод; 11 – подводящий шланг;
 12 – канализация; 13 – мерная емкость; 14 – станина; 15 – лабораторный стол*

Если установка герметична, то в напорном баке набирается уровень заданный преподаватель, затем один из студентов снимает сливной шланг 4 с крепления и направляет его в сливной бак 2. При этом высота удержания шланга должна быть такой, чтобы показания во всех мерных трубках 8 не опустились ниже фиксируемых отметок. После этого при помощи вентиля 9 устанавливается постоянство уровня воды в напорном баке на заданном преподавателем значении, и установка выдерживается 2 – 3 минуты для стабилизации потока. При этом и на протяжении всей работы вентиль 9 не перекрывают.

Затем по команде студента, ведущего записи результатов эксперимента, мерная емкость 13 подставляется под сливной шланг 4 и одновременно включается секундомер. В это время еще один студент называет ведущему записи показания мерных трубок. После заполнения мерной емкости до заданного преподавателем объема секундомер останавливают, а воду из нее выливают в сливной бак 2. Затем еще дважды измеряют время заполнения мерной емкости и одновременно записывают показания по мерным трубкам. Разности в замерах времени не должны отличаться более чем на 1-1,5 с. В ином случае замеры повторяют до получения трех сходимых результатов.

После этого при помощи вентиля 9 устанавливают следующий заданный преподавателем уровень воды в напорном баке 1. Для быстроты набора уровня рекомендуется сливной

шланг 4 поднять и закрепить. После набора уровня вновь устанавливают его постоянство при опущенном в сливной бак 2 сливном шланге 4. После этого по аналогии с первым уровнем добиваются трех замеров с близкими по значению результатами времени заполнения мерной емкости 13. Таким же образом устанавливают третий заданный преподавателем уровень воды в напорном баке 1 и проводят замеры при нем.

По завершении всех измерений сливной шланг 4 оставляют в сливном баке 2 и сливают воду из напорного бака до минимальных показаний уровнемера 5. После этого вентиль 9 перекрывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают среднее арифметическое значение каждого показателя для каждого уровня воды в напорном баке. Например, показания в первой трубке Пито для первого уровня воды в напорном баке $P_{1.1}$ будут равны:

$$P_{1.1} = \frac{P_{1.1.1} + P_{1.1.2} + P_{1.1.3}}{3},$$

где $P_{1.1.1}$ - $P_{1.1.3}$ – показатели в первой трубке Пито, полученные при трех замерах времени заполнения мерной емкости при первом из заданных уровней воды.

2. Рассчитывают объемный расход воды для каждого уровня воды в напорном баке:

$$V_c = \frac{3 \cdot V}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – заданный объем заполнения мерной емкости, м^3 ; τ – время заполнения заданного объема мерной емкости, с.

3. Рассчитывают площади поперечных сечений трубопровода (поз. 3 на рис. 4):

$$F_1 = F_2 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}; \quad F_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4}; \quad F_4 = F_5 = \frac{\pi \cdot d_4^2}{4}, \text{ м}^2,$$

где d_1, d_3, d_4 – внутренние диаметры трубопровода, показанные на рис. 5 и равные $d_1=d_2=40$ мм; $d_3=22$ мм; $d_4=d_5=30$ мм.

4. Рассчитывают средние скорости течения воды для каждого сечения трубопровода (поз. 3 на рис. 4) для каждого уровня воды в напорном баке:

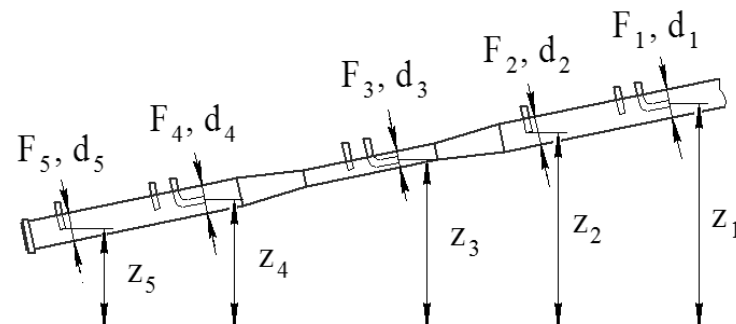


Рис. 5. Схема трубопровода переменного сечения для установки «Уравнение Бернулли»

$$w_1 = w_2 = \frac{V_c}{F_1}; \quad w_3 = \frac{V_c}{F_3}; \quad w_4 = w_5 = F \frac{V_c}{S_4}, \text{ м}^2$$

5. Рассчитывают средний по сечению динамический напор для каждого сечения трубопровода (поз. 3 на рис. 4) для каждого уровня воды в напорном баке:

$$h_{д1} = h_{д2} = \frac{w_1^2}{2 \cdot g}; \quad h_{д3} = \frac{w_3^2}{2 \cdot g}; \quad h_{д4} = h_{д5} = \frac{w_4^2}{2 \cdot g}$$

6. Определяют максимальный динамический напор, наблюдаемый по центру сечения для каждого сечения и для каждого уровня воды в напорном баке:

$$h_{д\max} = E - P$$

При этом принимается, что $E_1 = E_2$ и $E_4 = E_5$.

7. Рассчитывают потерянный напор на участках для каждого уровня воды в напорном баке:

$$h_{п1 \rightarrow 2} = (z_1 - E_1) - (z_2 - E_2); \quad h_{п1 \rightarrow 3} = (z_1 - E_1) - (z_3 - E_3);$$

$$h_{п1 \rightarrow 4} = (z_1 - E_1) - (z_4 - E_4); \quad h_{п1 \rightarrow 5} = (z_1 - E_1) - (z_5 - E_5),$$

где $z_1 - z_5$ – геометрические напоры, показанные на рис. 5 и равные $z_1 = 91,3$ мм; $z_2 = 83,7$ мм; $z_3 = 77,5$ мм; $z_4 = 71,1$ мм; $z_5 = 65,2$ мм.

8. Строят графики распределения напоров по длине трубопровода для каждого уровня воды в напорном баке в соответствии со схемой на рис. 6.

9. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

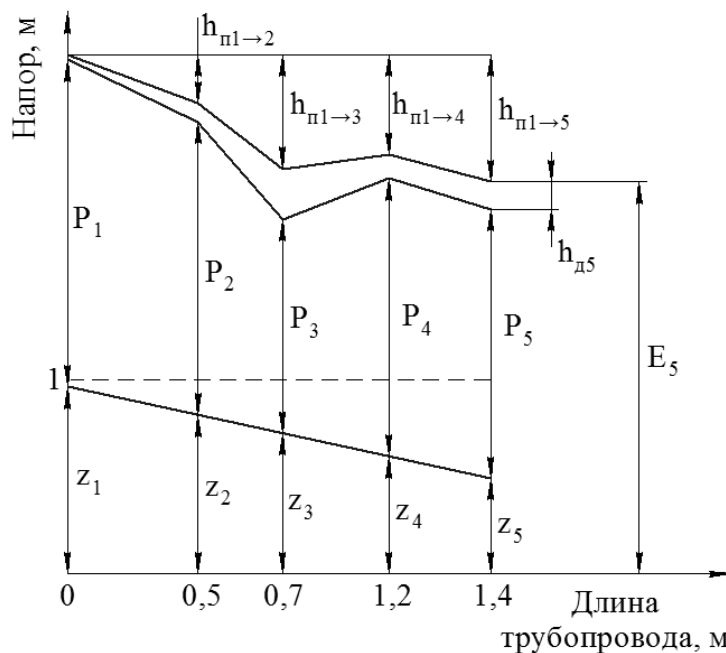


Рис. 6. Схема построения графика распределения напоров

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Уровень воды в напорном баке, см	Объем заполнения мерное емкости, л	Вариант	Уровень воды в напорном баке, см	Объем заполнения мерное емкости, л
1	155; 165; 185	3	4	155; 160; 165	2
2	150; 160; 170	2	5	160; 165; 170	3
3	160; 170; 180	3	6	170; 175; 180	2

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называют напором жидкости?
2. Напишите уравнение Бернулли для идеальной и реальной жидкостей. Назовите составляющие и объясните отличие.
3. В чем заключается физический смысл уравнения Бернулли?
4. В чем заключается физический смысл составляющих уравнения Бернулли?
5. Какие следствия и из уравнения Бернулли Вы знаете?
6. Как измеряются статический и динамический напоры?
7. Чем объясняется скачок на графике распределения напоров?
8. Как изменяется соотношение между величинами напоров с увеличением скорости течения жидкости?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Сайритдинов С.Ш. Основы гидравлики: учебник для вузов - М.: Издательство АСВ, 2014. - 386 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300263.html>);
3. Аракелян С.М. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией: Учеб. пособие – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – 99 с (наличие в библиотеке ВлГУ и доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4549/1/01506.pdf>);
4. Самарин О.Д. Гидравлические расчеты инженерных систем: Справоч. пособие. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. - 112 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300140.html>).

Лабораторная работа 4. Испытание расходомера типа трубы Вентури

Цель выполнения лабораторной работы

1. Определить коэффициент расхода трубы Вентури при различных начальных значениях напора жидкости;
2. Выявить зависимость коэффициента расхода трубы Вентури от начального напора жидкости.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Δh , см	№ замера	τ , с	$V_c \cdot 10^{-3}$, м ³ /с	$V_c^{cp} \cdot 10^{-3}$, м ³ /с	K_v , %	α

Примечание: пояснения к обозначениям даны в методике обработки результатов эксперимента

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Данная работы проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 7.

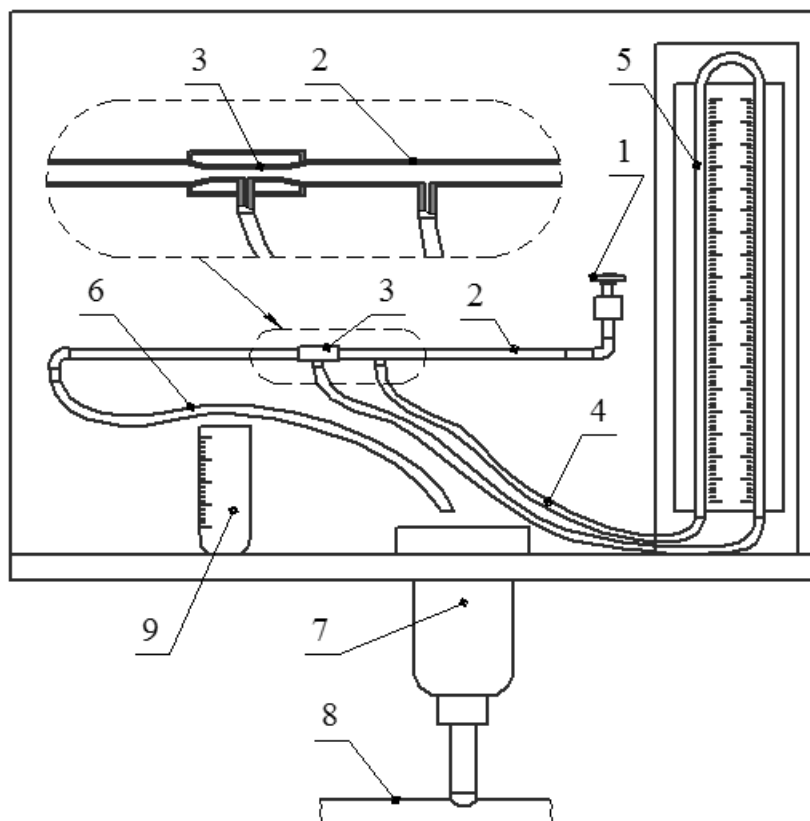


Рис. 7. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Испытание расходомера типа трубы Вентури»: 1 – вентиль подачи воды; 2 – исследуемый трубопровод; 3 – труба Вентури; 4 – шланги; 5 – дифференциальный манометр; 6 – сливной шланг; 7 – слив; 8 – канализация; 9 – мерная емкость; 10 – лабораторный стол

Перед началом эксперимента проверяется положение сливного шланга 6: он должен быть направлен на слив в канализацию. Также проверяется равенство уровней жидкости в трубках дифференциального манометра 5. В случае разности показаний о нем сообщается преподавателю, после чего неисправность устраняется.

Эксперимент начинается с подачи воды в трубопровод 2 путем открытия вентиля 1. Установка проверяется на герметичность. В случае обнаружения течи о ней сообщается преподавателю, после чего неисправность устраняется.

Если установка герметична, то при помощи вентиля 1 устанавливается заданная преподавателем разность в показаниях на дифференциальном манометре 5. Для этого из числа студентов, выполняющих работу, выбирается один студент, который будет следить за уровнем жидкости в трубках дифференциального манометра, а второй студент по указаниям первого будет регулировать подачу воды вентилем 1. Уровень воды в трубках может быть любым по значениям, задача студентов, чтобы при нахождении разницы между ними получилось заданное преподавателем число.

После установления нужной разности показаний необходимо подождать 2 – 3 мин для стабилизации потока. После этого один из студентов перебрасывает конец сливного шланга 6 в мерную емкость 9. Одновременно студент, ведущий записи экспериментальных данных, запускает секундомер и фиксирует время заполнения заданного преподавателем объема. При выполнении замера необходимо соблюдение заданной разности в показаниях трубок дифференциального манометра. После заполнения мерной емкости 9 конец сливного шланга вновь перебрасывается на слив 7. После этого в воду, находящуюся в мерной емкости, опускается термометр и удерживается в ней в течении 2 – 3 минут для точности показаний.

После измерения температуры термометр извлекается, а вода из мерной емкости 9 выливается в слив 7. Затем еще дважды измеряется время заполнения мерной емкости, при этом температуру повторно измерять не нужно. Показания замеров времени должны различаться не больше, чем на 1 сек. В ином случае замеры повторяют до получения трех близких по значениям результатов времени заполнения.

Затем при помощи вентиля 1 выставляется следующая заданная преподавателем разность показаний дифференциального манометра 5. При ней также добиваются трех близких значений времени заполнения мерной емкости 9, а при первом ее заполнении вновь измеряется температура воды. Аналогично выставляется третья заданная разность показаний дифференциального манометра 5 и проводятся измерения времени заполнения и температуры.

По завершении всех измерений вентиль 1 перекрывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Определяют расход жидкости при каждом замере:

$$V_c = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V_c – секундный объемный расход; V – заданный объем заполнения мерной емкости, м^3 ; τ – время заполнения заданного объема мерной емкости, с.

2. Определяют средний расход жидкости при каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$V_c^{cp} = \frac{V_{c1} + V_{c2} + V_{c3}}{3}, \text{ м}^3/\text{с},$$

3. Рассчитывают коэффициент вариации для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$K_B = \frac{100\%}{V_c^{cp}} \sqrt{\frac{(V_{c1} - V_c^{cp}) + (V_{c2} - V_c^{cp}) + (V_{c3} - V_c^{cp})}{2}}$$

При величине $K_B \geq 5\%$ замеры для этой разности показаний в трубках дифференциального манометра необходимо провести повторно.

4. Определяют коэффициент расхода для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра:

$$\alpha = \frac{4 \cdot V_c^{cp}}{\pi \cdot d_2^2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2},$$

где d_1 – внутренний диаметр широкой части трубопровода, равный 16 мм; d_2 – внутренний диаметр сужения, равный 7 мм; h_n – потери напора, равные разности показаний в трубках дифференциального манометра Δh .

5. Построить график зависимости коэффициента расхода от среднего расхода воды для каждой разности показаний в трубках дифференциального манометра.

6. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Разность уровня жидкости в трубках дифференциального манометра, см	Объем заполнения мерной емкости, л
1	2	0,5
2	4	0,75
3	6	1,0
4	8	0,5
5	10	0,75
6	12	1,0

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Написать и объяснить уравнение неразрывности (сплошности) потока.
2. Какие следствия из уравнения неразрывности (сплошности) потока Вы знаете?
3. В чем заключается отличие в уравнениях неразрывности (сплошности) потока для капиллярных и упругих жидкостей?
4. Почему возникает разность напоров между трубопроводом и трубой Вентури?
5. От каких параметров зависит коэффициент расхода трубы Вентури? Какой из них по Вашему мнению оказывает наибольшее влияние и почему?
6. Перечислите достоинства и недостатки трубы Вентури.
7. Какими способами можно увеличить расход жидкости?
8. Расскажите методику определения коэффициента расхода трубы Вентури.

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Сайритдинов С.Ш. Основы гидравлики: учебник для вузов - М.: Издательство АСВ, 2014. - 386 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300263.html>);
3. Аракелян С.М. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией: Учеб. пособие – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – 99 с (наличие в библиотеке ВлГУ и доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4549/1/01506.pdf>);

4. Самарин О.Д. Гидравлические расчеты инженерных систем: Справоч. пособие. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. - 112 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300140.html>).

Лабораторная работа 5. Истечение жидкости из отверстий и насадок

Цель выполнения лабораторной работы

1. Определить параметры истечения жидкости из сосуда через различные насадки при постоянном уровне жидкости;
2. Определить параметры истечения жидкости из сосуда через различные насадки при переменном уровне жидкости.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Высота уровня воды в напорном баке, см		Вид отверстия или насадки	Диаметр отверстия или насадки, мм		Объем вытекающей воды, м ³	Время истечения, с
в начале опыта	в конце опыта		на входе	на выходе		

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Данная работы проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 8.

Перед началом эксперимента проверяется, чтобы конец подводящего шланга 6 был закреплен в напорном баке 1, а шланг из сливного бака 2 подсоединен к канализации 9. Также необходимо, чтобы все отверстия и насадки 3 были перекрыты.

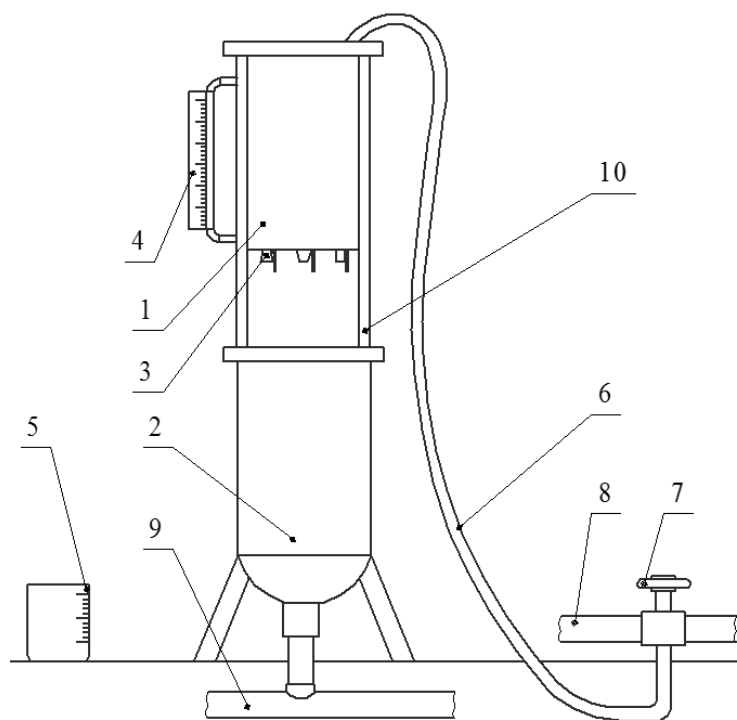


Рис. 8. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Истечение жидкости из отверстий и насадок»: 1 – напорный бак; 2 – сливной бак; 3 – отверстия и насадки; 4 – уровнемер; 5 – мерная емкость; 6 – подводящий шланг; 7 – вентиль; 8 – водопровод; 9 – канализация; 10 – станина

Затем при помощи вентилля 7 включается подача воды в напорный бак 1 и ведется контроль уровня жидкости при помощи уровнемера 4. Если по мере заполнения напорного бака 1 возникает течь, то о ней сообщается преподавателю и неисправность устраняется.

Если установка герметична, то продолжают ее заполнение до уровня, заданного преподавателем. Затем, не прекращая подачи воды, открывается указанная преподавателем насадка или отверстие 3. Затем нужно подождать 2 – 3 минуты для стабилизации режима истечения.

После этого под открытую насадку 3 (отверстие) подставляется мерная емкость 5 и одновременно включается секундомер. Замеряется время заполнения мерной емкости 5 до объема, заданного преподавателем. Затем эта насадка 3 (отверстие) закрывается, открывается вторая заданная преподавателем. Для нее также проводятся замеры времени заполнения требуемого объема.

После этого насадка 3 (отверстие) закрывается, перекрывается вентиль 7 и вновь открывается первая насадка 3, одновременно включается секундомер. При этом мерную емкость 5 использовать не нужно. Когда уровень воды в напорном баке 1 уменьшится на половину записывается показание времени. Прошедшее время записывается и после полного истечения воды из бака.

После этого насадка 3 (отверстие) закрывается и вновь при помощи вентиля 7 проводится заполнение напорного бака 1 до прежнего уровня. После заполнения вентиль 7 перекрывается и вновь открывается вторая насадка 3 (отверстие) и одновременно включается секундомер. Записывается время истечения половины и всего объема воды из напорного бака 1.

После этого насадка 3 (отверстие) перекрывается, в очередной раз открывается вентиль 7 и напорный бак 1 заполняется до следующего заданного преподавателем уровня. После заполнения бака проводятся аналогичные измерения времени заполнения заданного объема из тех же насадок 3 (отверстий) при постоянном уровне воды в баке (не перекрывая вентиль 7), а затем измеряется время частичного и полного истечения воды из бака через каждую из них в отдельности (при перекрытом вентиле 7).

После последнего полного истечения воды из напорного бака 1 открытую насадку 3 (отверстие) закрывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают площадь входного и выходного отверстия, выбирая размеры из справочной таблицы в соответствии с используемыми в работе отверстиями насадками:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2$$

2. Рассчитывают коэффициент сжатия струи:

$$\varepsilon = \frac{F_{\text{сж}}}{F_{\text{отв}}},$$

где $F_{\text{сж}}$ – наименьшая площадь сечения струи, м^2 .

3. Рассчитывают расход жидкости для каждого вида насадки (отверстия) при постоянном уровне воды в напорном баке:

$$V_c = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – объем заполнения мерной емкости, м^3 ; τ – время истечения, с.

4. Рассчитывают коэффициент расхода для каждого вида насадки (отверстия) при постоянном уровне воды в напорном баке:

$$\varepsilon = \frac{V_c}{F_{\text{отв}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$

5. Рассчитывают теоретическое время истечения воды из бака:

- для частичного истечения жидкости от уровня h_1 до уровня h_2 :

$$\tau = \frac{2 \cdot F \cdot \sqrt{h_1 - h_2}}{\alpha \cdot F_{\text{отв}} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}$$

- для полного истечения жидкости:

$$\tau = \frac{2 \cdot F \cdot h}{\alpha \cdot F_{\text{отв}} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}$$

6. Результаты расчетов сводят в таблицу.

Вид от- верстия или насадки	Высота уровня воды в напорном баке, см		Параметры истечения			Время истечения, с	
	в начале опыта	в начале опыта	ε	φ	α	экспери- менталь- ное	расчет- ное

7. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

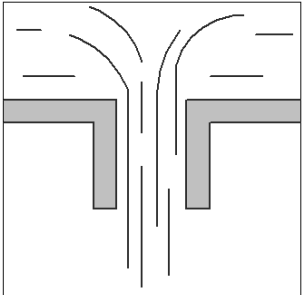
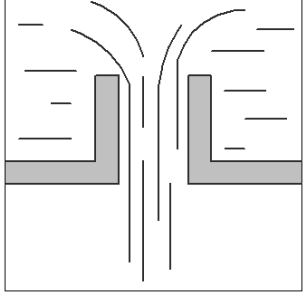
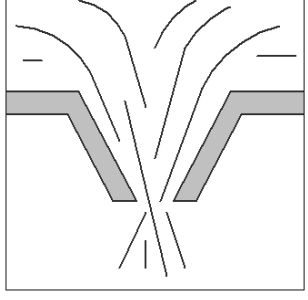
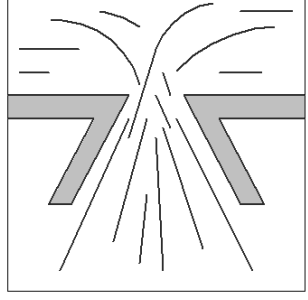
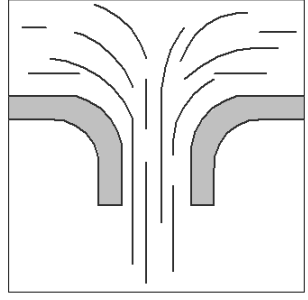
Вариант	Тип насадки (отверстия)	Уровень воды в баке, см	Вариант	Тип насадки (отверстия)	Уровень воды в баке, см
1	1; 3	20; 25	4	2; 5	20; 25
2	1; 5	20; 30	5	3; 5	20; 30
3	2; 3	15; 20	6	1; 3	15; 20

Примечание: тип насадки (отверстия) соответствует таблице

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

№ п/п	Схема	Название и характеристики
1		<p>Цилиндрическая внешняя насадка</p> <ul style="list-style-type: none"> - диаметр $d_1=d_2 = 8$ мм; <p>Справочные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 1,00$; - коэффициент скорости истечения $\varphi = 0,82$; - коэффициент расхода $\alpha = 0,82$;
2		<p>Цилиндрическая внутренняя насадка</p> <ul style="list-style-type: none"> - диаметр $d_1=d_2 = 8$ мм; <p>Справочные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 1,00$; - коэффициент скорости истечения $\varphi = 0,71$; - коэффициент расхода $\alpha = 0,71$;
3		<p>Коническая сходящаяся насадка</p> <ul style="list-style-type: none"> - диаметр на входе $d_1= 10$ мм; - диаметр на выходе $d_2 = 8$ мм; <p>Справочные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - угол конусности 13°; - коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 0,98$; - коэффициент скорости истечения $\varphi = 0,96$; - коэффициент расхода $\alpha = 0,94$;
4		<p>Коническая расходящаяся насадка</p> <ul style="list-style-type: none"> - диаметр на входе $d_1= 8$ мм; - диаметр на выходе $d_2 = 10$ мм; <p>Справочные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - угол конусности 8°; - коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 1,00$; - коэффициент скорости истечения $\varphi = 0,45$; - коэффициент расхода $\alpha = 0,45$;
5		<p>Коноидальная насадка</p> <ul style="list-style-type: none"> - диаметр $d_1 \approx d_2 = 8$ мм; <p>Справочные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 1,00$; - коэффициент скорости истечения $\varphi = 0,45$; - коэффициент расхода $\alpha = 0,45$;

Контрольные вопросы

1. Что такое параметры истечения? Расскажите их физический смысл.
2. Как рассчитываются параметры истечения?
3. Как рассчитывается время частичного и полного истечения?
4. Какие виды насадок Вы знаете? В чем особенность истечения жидкости через них?
5. Расположите насадки по мере убывания их гидравлического сопротивления. Объясните свой выбор.
6. Опишите методику проведения работы.
7. Расположите насадки по мере убывания их коэффициента расхода. Объясните причины.
8. Расположите насадки по мере убывания их коэффициента скорости истечения. Объясните причины.

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Сайритдинов С.Ш. Основы гидравлики: учебник для вузов - М.: Издательство АСВ, 2014. - 386 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300263.html>);
3. Аракелян С.М. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией: Учеб. пособие – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – 99 с (наличие в библиотеке ВлГУ и доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4549/1/01506.pdf>);
4. Самарин О.Д. Гидравлические расчеты инженерных систем: Справоч. пособие. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. - 112 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300140.html>).

Лабораторная работа 6. Изучение процесса теплопередачи

Цель выполнения лабораторной работы

1. Определить коэффициент теплопередачи пластинчатого теплообменника-воздухоподогревателя;
2. Изучить влияние температурного режима на эффективность теплопередачи в пластинчатом теплообменнике-воздухоподогревателе;

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

$t_{1н},$ °C	$t_{2н},$ °C	$t_{1к},$ °C	$t_{2к},$ °C	$t_{1ср},$ °C	$t_{2ср},$ °C	$\rho_1,$ кг/м ³	$\rho_2,$ кг/м ³	$c_1,$ $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$	$c_2,$ $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$	$Q_1,$ Вт	$Q_2,$ Вт	$\Delta t_{ср},$ °C	$K,$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$

Примечание: пояснения к обозначениям даны в методике обработки результатов эксперимента

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студентам не допускаются к выполнению работы.

Данная работа проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 9.

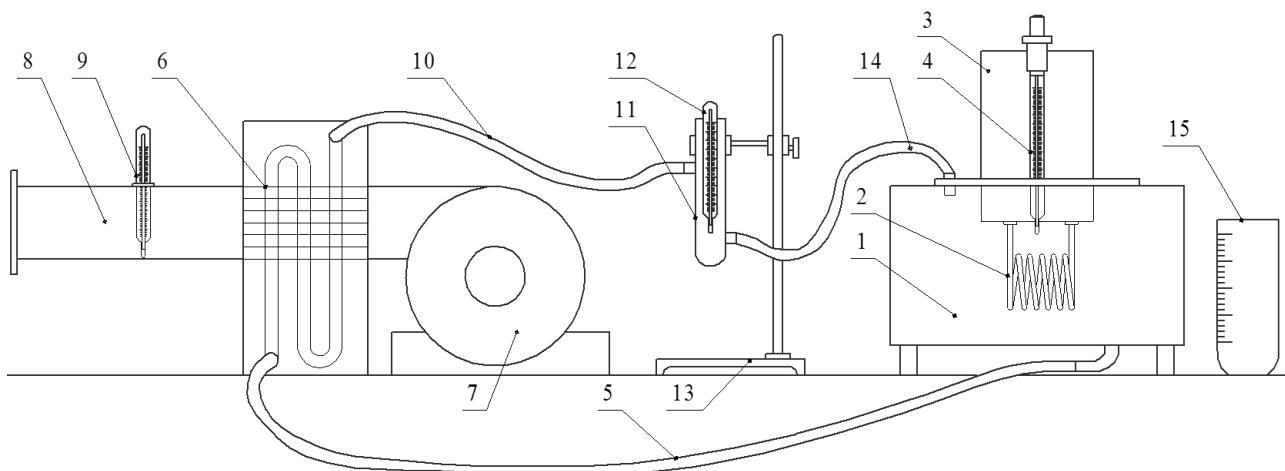


Рис. 9. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Изучение процесса теплопередачи»: 1 – бак; 2 – нагревательный элемент; 3 – блок управления; 4 – термометр термостата; 5 – отводящий шланг; 6 – пластинчатый теплообменник; 7 – центробежный вентилятор; 8 – труба отвода нагретого воздуха; 9 – термометр теплообменника; 10 – соединительный шланг; 11 – промежуточная емкость; 12 – промежуточный термометр; 13 – штатив; 14 – подводящий шланг; 15 – мерная емкость

Перед началом эксперимента проверяется уровень воды в баке термостата 1: он должен составлять не менее 80 % от его объема. В ином случае необходимо добавить воды в бак 1. Также проверяется надежность соединения шлангов.

После этого студент ведущий записи экспериментальных данных записывает показания термометра 9, это будет начальная температура воздуха $t_{2н}$ для обоих опытов. Затем на термометре термостата 4 выставляется заданная преподавателем температура нагрева воды $t_{1н}$. После этого реле на блоке управления 3 ставится в позицию «нагрев». По достижении заданной температуры «реле» на блоке управления 3 ставится в позицию «циркуляция» и одновременно включается вентилятор 7. После этого ожидают около 5 минут для стабилизации режима теплообмена.

По истечении этого времени записывают показания термометров 9 (это будет конечная температура воздуха $t_{2к}$) и 12 (конечная температура воды $t_{1к}$). Затем один из студентов берет конец шланга 14 и перебрасывает его в мерную емкость 15. Одновременно включают секундомер и замеряют время заполнения емкости 15 до заданного преподавателем объема. Воду из емкости выливают обратно в бак 1, а конец шланга 14 возвращают в бак 1. Так проводят три замера с получением результатов, отличающихся друг от друга не более чем на 1 – 1,5 с. В ином случае замеры повторяют.

После этого вентилятор выключают, реле на блоке управления 3 ставится в позицию «нагрев», а на термометре 4 задается вторая заданная преподавателем температура. По достижении этой температуры реле на блоке управления 3 ставится в позицию «циркуляция» и одновременно включается вентилятор 7. После этого ожидают около 5 минут для стабилизации режима теплообмена. Вновь записывают значения $t_{2к}$ и $t_{1к}$ и замеряют время заполнения мерной емкости 15.

По завершении измерений вентилятор выключают, реле на блоке управления 3 ставят в позицию «выключено», наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Определяют среднее значение температур теплоносителей для каждого опыта:

$$t_{1cp} = \frac{t_{1н} + t_{1к}}{2}; \quad t_{2cp} = \frac{t_{2н} + t_{2к}}{2}.$$

2. Определяют плотность и теплоемкость воды при температуре t_{1cp} по данным таблицы для каждого опыта:

температура t , °C	20	30	40	50	60	70
плотность ρ , кг/м ³	998	996	992	988	983	978
теплоемкость c , Дж/(кг·°C)	4190	4180	4180	4180	4180	4190

Для этого применяют формулу линейного интерполирования. Например, плотность будет определяться по формуле:

$$\rho_{\text{в1}} = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где t_1 – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному; t_2 – значение температуры, ближайшее большее к измеренному; t – измеренное значение температуры; ρ_1, ρ_2 – значения плотности воды при температурах t_1, t_2 .

3. Определяют плотность воздуха при температуре $t_{2\text{cp}}$ для каждого опыта:

$$\rho_{\text{в2}} = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{t_{2\text{cp}} + 273}$$

4. Определяют теплоемкость воздуха при температуре $t_{2\text{cp}}$ по данным таблицы для каждого опыта при помощи формулы линейного интерполирования:

температура $t, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	70
теплоемкость $c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,009

5. Определяют массовый расход воды:

$$G_1 = \frac{3 \cdot V}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \cdot \rho_{\text{в1}}, \text{ кг/с},$$

где V – заданный объем заполнения мерной емкости, м^3 ; τ – время заполнения заданного объема мерной емкости, с.

6. Определяют массовый расход воздуха:

$$G_2 = w_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} \cdot \rho_{\text{в2}}, \text{ кг/с},$$

где w_2 – скорость воздуха в трубе (поз. 8 на рисунке 9), равная 4,3 м/с; $d_{\text{тр}}$ – диаметр трубы, равный 0,145 м.

7. Определяют тепловые потоки:

- для воды:

$$Q_1 = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}});$$

- для воздуха:

$$Q_2 = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_{2\text{н}} - t_{2\text{к}});$$

8. Рассчитывают среднюю движущую силу:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \cdot \lg \left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)},$$

где $\Delta t_{\text{б}}, \Delta t_{\text{м}}$ – наибольшая и наименьшая разности температур, получаемые при построении графика (см. рис. 10) и определяемые по формулам:

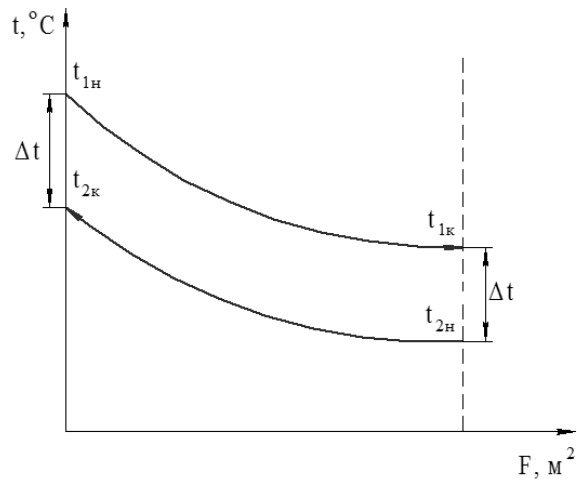


Рис. 10. Распределение температур теплоносителей

$$\Delta t_6 = t_{1к} - t_{2н}$$

$$\Delta t_M = t_{1н} - t_{2к}$$

9. Определяет коэффициент теплопередачи через тепловой поток по воде:

$$K = \frac{Q_1}{\Delta t_{cp} \cdot F},$$

где F – площадь теплопередающей поверхности, равная 0,93 м².

10. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Начальная температура воды, °С	Объем заполнения мерной емкости, л	Вариант	Начальная температура воды, °С	Объем заполнения мерной емкости, л
1	40; 60	1,0	4	40; 80	1,0
2	40; 70	0,5	5	60; 80	0,5
3	50; 70	0,7	6	50; 80	0,7

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;

6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический смысл коэффициента теплопередачи?
2. Как определить коэффициент теплопередачи?
3. Какие факторы влияют на процесс теплопередачи?
4. Что такое движущая сила и средняя движущая сила теплопередачи?
5. Объясните тепловой баланс процесса теплопередачи.
6. В чем отличие стационарного теплообмена от нестационарного?
7. Какие схемы движения теплоносителей Вы знаете? Назовите преимущества и недостатки каждой.
8. Какие промышленные теплоносители Вам известны? Назовите преимущества и недостатки.

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Сайритдинов С.Ш. Основы гидравлики: учебник для вузов - М.: Издательство АСВ, 2014. - 386 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300263.html>);
3. Кудинов А.А. Тепломассообмен: учебное пособие – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 375 с. (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=463148>);
4. Самарин О.Д. Гидравлические расчеты инженерных систем: Справоч. пособие. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. - 112 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300140.html>).

Лабораторная работа 7. Исследование фракционной перегонки

Цель выполнения лабораторной работы

1. Изучить влияние температуры на концентрацию легколетучего компонента в кубовой жидкости и дистилляте;
2. Изучить изменение концентрации легколетучего компонента в кубовой жидкости и дистилляте по мере проведения перегонки;

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Время от начала эксперимента, с	Температура в кубе, °С	Пробоотборники			Масса дистиллята, г		Показатель преломления	Доля легколетучего компонента	
		№	масса пустого, г	масса с дистиллятом, г	в пробоотборнике	суммарная		В пробоотборнике	В кубе

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Данная работа проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 11. Перед началом работы готовится раствор легколетучего компонента, концентрация и количество которого задается преподавателем. Приготовленный раствор заливается в перегонный куб 1. Включают рефрактометр (см. рис. 12) в сеть и проверяют его рабочее состояние. В случае неисправности о ней сообщают преподавателю, и неисправность устраняется.

Если рефрактометр исправен, то отбирают при помощи пипетки и груши несколько капель исходного раствора и помещают их на предметное стекло рефрактометра (см. рис. 12, б).

Определение показателя преломления проводят по следующей методике:

После помещения капель пробы на предварительно протертое предметное стекло закрывают камеру осветителя и направляют свет от осветителя через специальное стекло камеры, называемое ширмой. После этого через окуляр наблюдают за распределением осветленного и затемненного пространств (см. рис. 12, в). Перемещая окуляр вверх или вниз (показано стрелками на рис. 12, а) совмещают две черты в окуляре с границей осветленного и затемненного пространств (показано стрелками на рис. 12, в). Записывают показания, соответствующие расположению черт окуляра на градуировочной шкале рефрактометра.

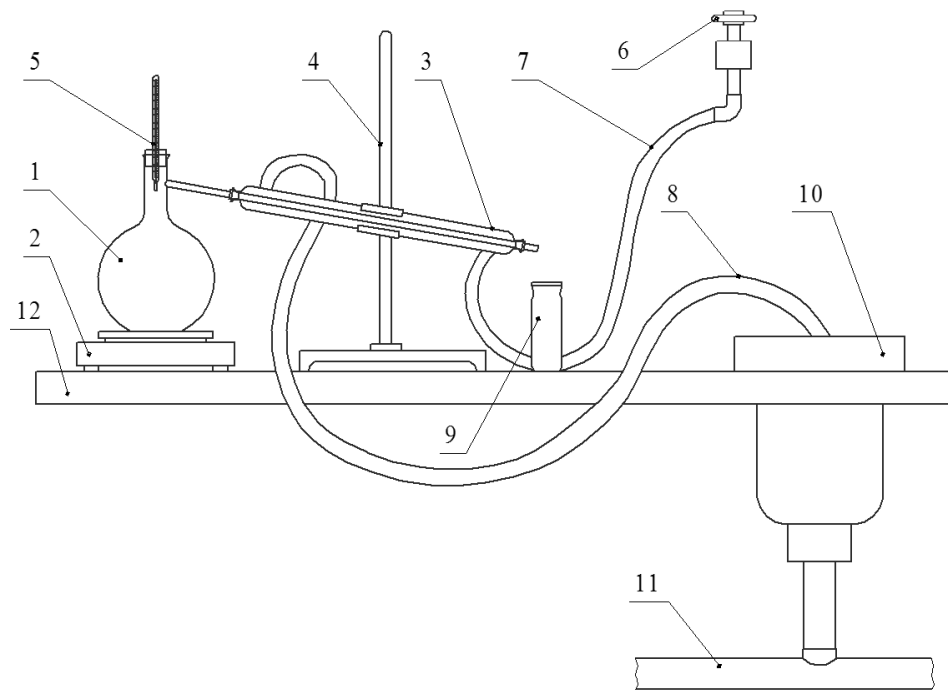


Рис. 11. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Исследование фракционной перегонки»: 1 – перегонный куб; 2 – колба нагреватель; 3 – водяной холодильник; 4 – штатив; 5 – термометр; 6 – вентиль; 7 – подводящий шланг; 8 – сливной шланг; 9 – пробоотборник; 10 – слив; 11 – канализация; 12 – лабораторный стол

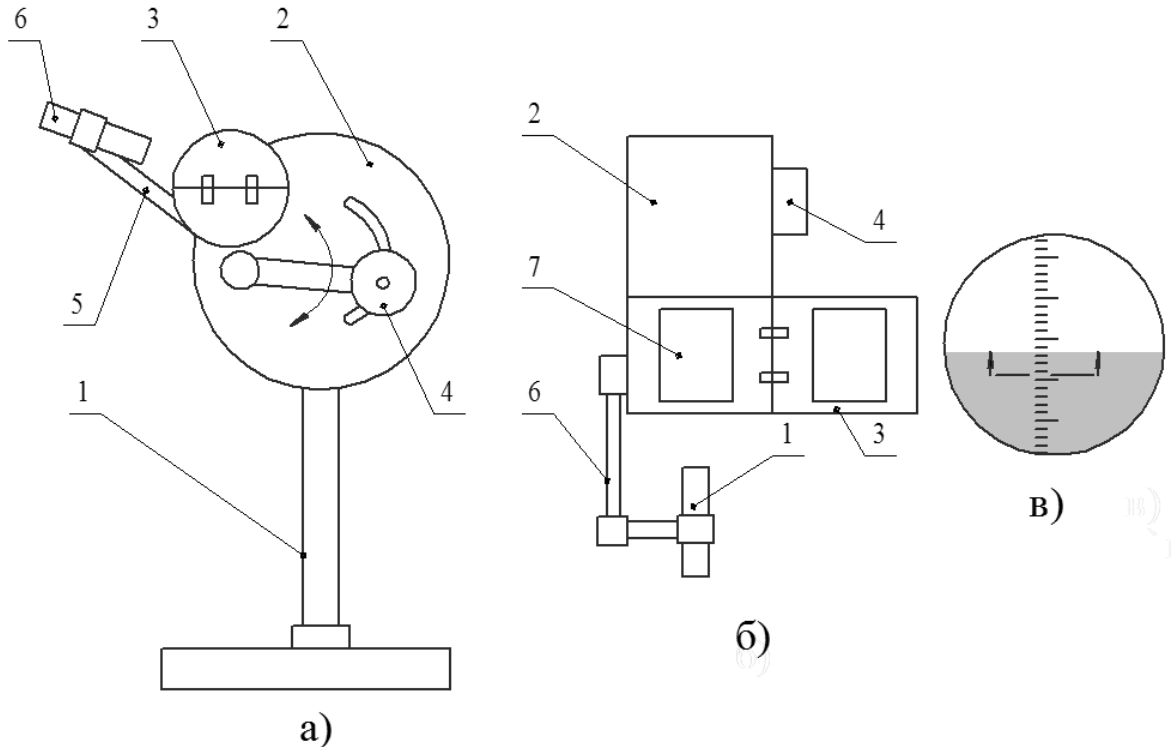


Рис. 12. Схема рефрактометра: а – общий вид; б – вид сверху; в – схема определения; 1 – основание; 2 – корпус; 3 – камера осветителя; 4 – окуляр; 5 – шарнирный держатель осветителя; 6 – осветитель; 7 – предметное стекло

Таким же образом определяют показатели преломления в пробах дистиллята и кубового остатка, после каждого определения протирают предметное стекло фильтровальной бумагой.

Перед началом эксперимента проверяют чистоту пробоотборников 9 и в случае, если они грязные заменяют их. Чистые пробоотборники 9 взвешивают и записывают результат. Также проверяют, чтобы конец сливного шланга 8 находился в сливе, проверяют надежность крепления шлангов. Под выходной конец трубки перегонного куба 1 ставят первый пробоотборник 9.

После этого перегонный куб 1 помещается на колбонагреватель 2 и включается нагрев. В это же время при помощи вентиля 6 начинают подачу воды в холодильник 3. подача воды контролируется преподавателем. В случае обнаружения течи о ней сообщается преподавателю, и течь устраняется.

После этого ждут появления дистиллята в выходной трубке перегонного куба 1.

Когда дистиллят начинает капать в первый пробоотборник 9 запускают секундомер и записывают показания термометра 5. Затем термометр 5 извлекают и отбирают из куба несколько капель при помощи пипетки и груши, помещают отобранные капли на стекло рефрактометра (см. рис. 12, б) и определяют показатель преломления по указанной выше методике. После отбора пробы кубового остатка термометр 5 вновь помещают в перегонный куб 1.

После заполнения пробоотборника дистиллятом до заданного преподавателем объема он заменяется на следующий пробоотборник. Записывается время от начала эксперимента, температура в кубе и вновь отбирается проба из куба 1 для определения показателя преломления.

После заполнения пяти пробоотборников дистиллятом под выходную трубку перегонного куба 1 ставят пробоотборник для сбора остатков дистиллята, колбонагреватель выключают и ожидают завершения испарения в перегонном кубе 1. После этого ждут еще 10 – 15 минут, пока все пары не сконденсируются и выключают подачу воды в холодильник 3, перекрывая вентиль 6.

Затем взвешивают пробоотборники с дистиллятом, поочередно отбирают из каждого при помощи пипетки и груши несколько капель и помещают их на предметное стекло рефрактометра. Определяют показатель преломления для каждой пробы дистиллята.

Сливают дистиллят и его остатки в отдельную емкость и отдают ее преподавателю, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают суммарное количество дистиллята ΣD путем сложения масс дистиллята в пробоотборниках. Таким образом для первого пробоотборника суммарная масса будет

равна массе дистиллята в нем; для второго пробоотборника суммируют массу дистиллята в первом и втором пробоотборниках и т.д.

2. Рассчитывают концентрацию легколетучего компонента в пробах дистиллята x_D и кубового остатка x_W по измеренным показателям преломления n_D^{20} и данным таблицы:

x , масс %	n_D^{20}	x , масс %	n_D^{20}	x , масс %	n_D^{20}
0	1,33297	40	1,35800	85	1,36471
5	1,33616	50	1,36117	90	1,36419
10	1,33962	60	1,36328	95	1,36310
15	1,34326	70	1,36455	100	1,36130
20	1,34695	75	1,36482		
30	1,35349	80	1,36589		

Для этого применяют формулу линейного интерполирования:

$$x = x_1 + \frac{x_2 - x_1}{n_D^{20} - n_D^{20_1}} (n_D^{20} - n_D^{20_1}),$$

где $n_D^{20_1}$ – значение показателя преломления, ближайшее меньшее к измеренному; $n_D^{20_2}$ – значение показателя преломления, ближайшее большее к измеренному; n_D^{20} – измеренное значение показателя преломления; x_1, x_2 – значения концентрации легколетучего компонента при показателях преломления $n_D^{20_1}, n_D^{20_2}$.

3. Строят графики следующих зависимостей: $x_D = f(\Sigma D)$, $x_W = f(\Sigma D)$, $t = f(\Sigma D)$.

4. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Концентрация исходного раствора, %	Степень запол- нения пробоот- борников	Вариант	Концентрация исходного раствора, %	Степень запол- нения пробоот- борников
1	60	наполовину	4	65	целиком
2	70	целиком	5	75	наполовину
3	80	наполовину	6	85	целиком

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. На чем основано разделение жидких смесей перегонкой?
2. В чем отличие простой перегонки от ректификации?
3. Как изменяется состав дистиллята при фракционной перегонке и с чем это связано?
4. Как влияет давление на процесс перегонки?
5. Как можно повысить содержание легколетучего компонента в дистилляте?
6. Как формулируются законы Рауля и Дальтона?
7. Как классифицируют жидкие смеси по взаимной растворимости и по степени отклонения от закона Рауля?
8. Как строят фазовые диаграммы и диаграммы равновесия? Для чего они нужны?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Кудинов А.А. Тепломассообмен: учебное пособие – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 375 с. (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=463148>);
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>);
4. Самарин О.Д. Гидравлические расчеты инженерных систем: Справоч. пособие. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. - 112 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300140.html>).

5-Й СЕМЕСТР

Лабораторная работа 1. Изучение процесса отстаивания сточных вод

Цель выполнения лабораторной работы

1. Исследование динамики стесненного осаждения твердых частиц;
2. Определение времени, начальной скорости осаждения и скорости осаждения в критической точке.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя две таблицы на основе следующей таблицы:

Время осаждения, с	Высота неосветленного слоя жидкости, см	Высота осадка, мм	Скорость осаждения, см/с		
			расчетная	экспериментальная	
				начальная	в критической точке

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

В соответствии с заданием отвешивается проба твердого материала и помещается в стеклянный цилиндр на 500 мл. Затем цилиндр заполняется водой на 2 – 3 см выше верхней отметки сантиметровой шкалы. В цилиндр помещают термометр и оставляют на 2 – 3 мин для повышения точности измерений. Затем записывают температуру воды и извлекают термометр из цилиндра.

После этого цилиндр ставится напротив источника света (например, освещенного окна) и из числа студентов, выполняющих работу, выбирается один, который будет фиксировать изменение границы неосветленного слоя. Содержимое цилиндра перемешивается специальной мешалкой движениями вверх – вниз до получения однородной суспензии, но не менее 3 – 4 мин. Чтобы исключить эффект турбулентности ждут, пока граница неосветленного слоя не достигнет верхней отметки сантиметровой шкалы и включают секундомер. Если в течении 10 – 15 с визуально обнаружить границу неосветленного слоя не удастся, то суспензию вновь перемешивают. Если повторно не удастся обнаружить границу неосветленного слоя, то сообщают преподавателю и решают возникшие затруднения.

Если удалось обнаружить границу неосветленного слоя, то через равные промежутки времени, заданные преподавателем, замеряют высоту неосветленного слоя и записывают время от начала эксперимента. С момента как на дне цилиндра появляется слой осадка высотой не менее 1 мм, начинают фиксировать его увеличение через эти же промежутки времени.

Когда видимая граница неосветленного слоя достигнет осадка на дне цилиндра, то записывают общее время от начала эксперимента и общую высоту осадка. После этого сливают содержимое цилиндра в специальную емкость для слива и промывают цилиндр.

Затем отвешивают пробу другого твердого материала и повторяют исследования по изложенной выше методике. По завершении второго опыта вновь смывают содержимое цилиндра в специальную емкость и промывают цилиндр. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают свойства воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы для каждого опыта:

температура t , °C	0	10	20	30	40	50
плотность ρ_v , кг/м ³	1000	1000	998	996	992	988
вязкость $\mu_v \cdot 10^{-6}$, Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования. Например, плотность будет определяться по формуле:

$$\rho_v = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где t_1 – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному; t_2 – значение температуры, ближайшее большее к измеренному; t – измеренное значение температуры; ρ_1 , ρ_2 – значения плотности воды при температурах t_1 , t_2 .

2. Рассчитывают критерий Архимеда для каждого опыта:

$$Ar_o = \frac{g \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{\mu_{\text{в}}^2},$$

где $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц пробы твердого материала, равный 0,63 мм; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц пробы твердого материала, которую берут из таблицы:

материал	глина	мел	доломит	известняк
плотность $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	2200	2300	2800	1700

3. Рассчитывают объем твердых частиц для каждого опыта:

$$V_{\text{ч}} = \frac{m_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}}},$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса пробы твердого материала, кг.

4. Рассчитывают объемную долю жидкости:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{ч}}}{V_{\text{ц}}},$$

где $V_{\text{ц}}$ – объем заполнения цилиндра, м³.

5. Рассчитывают критерий Рейнольдса для стесненного осаждения:

$$Re_o = \frac{Ar_o \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar_o \cdot \varepsilon^{4,75}}}$$

6. Определяют расчетное значение скорости осаждения:

$$w_{\text{ос}} = \frac{Re_o \cdot \mu_{\text{с}}}{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{с}}}$$

7. Строят кривую осаждения в координатах $H = f(\tau)$, где H – высота неосветленного слоя жидкости, τ – время осаждения (см. рис. 13).

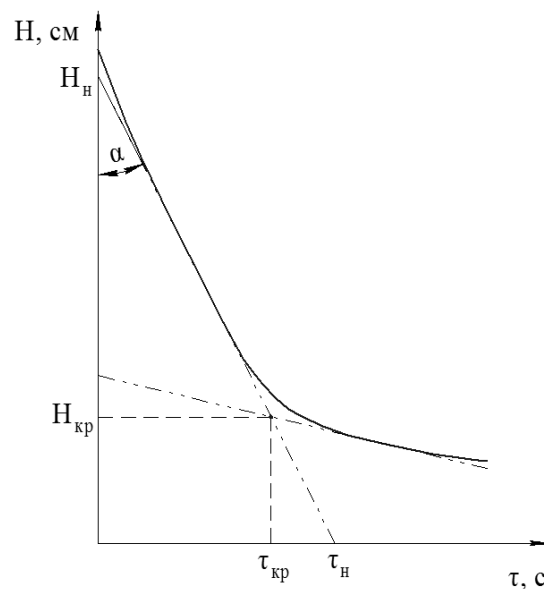


Рис. 13. Кривая осаждения

8. Определяют экспериментальные значения скорости осаждения:

- начальную скорость осаждения как тангенс угла наклона касательной проведенной к начальному участку кривой осаждения α или как отношение отрезков, отсекаемых этой касательной на осях:

$$w_{\text{ос.н}} = \operatorname{tg}\alpha = \frac{H_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}}$$

- скорость осаждения в критической точке как отношение высоты неосветленного слоя ко времени осаждения в точке, полученной при пересечении касательных к начальному и конечному участку кривой осаждения:

$$w_{\text{ос.кр}} = \frac{H_{\text{кр}}}{\tau_{\text{кр}}}$$

6. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г	Промежутки измерения, с
1	глина, доломит	10	5
2	мел, доломит	10	5
3	глина, известняк	15	2
4	мел, известняк	15	2
5	доломит, известняк	10	2
6	глина, мел	20	5

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие неоднородные системы можно разделять путем осаждения?
2. Какие виды осаждения, кроме гравитационного Вы знаете?
3. В каких аппаратах проводят гравитационное осаждение?
4. Для каких целей применяют осаждение?
5. В чем отличие свободного и стесненного осадений?
6. Какие виды осадков существуют?
7. Как определяют скорость осаждения?
8. Что такое кривая осаждения? Что по ней определяют и каким образом?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2015. – 79 с. (наличие в библиотеке ВлГУ доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4205/1/01415.pdf>);
3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 362 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429200>);
4. Фирсова Л.Ю. Системы защиты среды обитания. Схемы, сооружения и аппараты для очистки газовых выбросов и сточных вод: учеб. пособие - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. - 80 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367411>).

Лабораторная работа 2. Изучение интенсификации отстаивания сточных вод

Цель выполнения лабораторной работы

1. Исследование влияния коагуляции на гравитационное осаждение сточных вод;
2. Исследование влияния коагуляции и флокуляции на гравитационное осаждение сточных вод.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в

лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя две таблицы на основе следующей таблицы:

Время осаждения, с	Высота неосветленного слоя жидкости, см	Высота осадка, мм	Скорость осаждения, см/с		
			расчетная	экспериментальная	
				начальная	в критической точке

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

В соответствии с заданием отвешивается проба твердого материала и помещается в стеклянный цилиндр на 500 мл. Затем цилиндр заполняется водой на 2 – 3 см выше верхней отметки сантиметровой шкалы. В цилиндр помещают термометр и оставляют на 2 – 3 мин для повышения точности измерений. Затем записывают температуру воды и извлекают термометр из цилиндра. После этого по заданию преподавателя готовят 10 % водный раствор коагулянта ($Al_2(SO_4)_3$) в заданном количестве и добавляют его к содержимому цилиндра.

Затем цилиндр ставится напротив источника света (например, освещенного окна) и из числа студентов, выполняющих работу, выбирается один, который будет фиксировать изменение границы неосветленного слоя. Содержимое цилиндра перемешивается специальной мешалкой движениями вверх – вниз до получения однородной суспензии, но не менее 3 – 4 мин.

Чтобы исключить эффект турбулентности ждут, пока граница неосветленного слоя не достигнет верхней отметки сантиметровой шкалы и включают секундомер. Если в течении 10 – 15 с визуально обнаружить границу неосветленного слоя не удастся, то суспензию вновь перемешивают. Если повторно не удастся обнаружить границу неосветленного слоя, то сообщают преподавателю и решают возникшие затруднения.

Если удалось обнаружить границу неосветленного слоя, то через равные промежутки времени, заданные преподавателем, замеряют высоту неосветленного слоя и записывают

время от начала эксперимента. С момента как на дне цилиндра появляется слой осадка высотой не менее 1 мм, начинают фиксировать его увеличение через эти же промежутки времени.

Когда видимая граница неосветленного слоя достигнет осадка на дне цилиндра, то записывают общее время от начала эксперимента и общую высоту осадка.

После этого сливают содержимое цилиндра в специальную емкость для слива и промывают цилиндр.

Затем отвешивают пробу другого твердого материала, помещают ее в цилиндр и заливают аналогичным по сравнению с первым опытом количеством воды. Потом готовят 10% водный раствор коагулянта ($Al_2(SO_4)_3$) аналогично первому опыту и 0,5 % водный раствор флокулянта (полиакриламид) в заданных количествах. Растворы реагентов добавляют к содержимому цилиндра и повторяют исследования по изложенной выше методике. По завершении второго опыта вновь смывают содержимое цилиндра в специальную емкость и промывают цилиндр. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают свойства воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы для каждого опыта:

температура t , °C	0	10	20	30	40	50
плотность ρ_v , кг/м ³	1000	1000	998	996	992	988
вязкость $\mu_v \cdot 10^{-6}$, Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования. Например, плотность будет определяться по формуле:

$$\rho_v = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где t_1 – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному; t_2 – значение температуры, ближайшее большее к измеренному; t – измеренное значение температуры; ρ_1 , ρ_2 – значения плотности воды при температурах t_1 , t_2 .

2. Рассчитывают критерий Архимеда для каждого опыта:

$$Ar_0 = \frac{g \cdot d_c^3 \cdot \rho_v \cdot (\rho_c - \rho_s)}{\mu_v^2},$$

где d_c – диаметр частиц пробы твердого материала, равный 0,63 мм; ρ_c – плотность частиц пробы твердого материала, которую берут из таблицы:

материал	глина	мел	доломит	известняк
плотность ρ_c , кг/м ³	2200	2300	2800	1700

3. Рассчитывают объем твердых частиц для каждого опыта:

$$V_{\text{ч}} = \frac{m_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}}},$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса пробы твердого материала, кг.

4. Рассчитывают объемную долю жидкости:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{ч}}}{V_{\text{ц}}},$$

где $V_{\text{ц}}$ – объем заполнения цилиндра, м^3 .

5. Рассчитывают критерий Рейнольдса для стесненного осаждения:

$$Re_o = \frac{Ar_o \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar_o \cdot \varepsilon^{4,75}}}$$

6. Определяют расчетное значение скорости осаждения:

$$w_{\text{ос}} = \frac{Re_o \cdot \mu_c}{d_{\text{ч}} \cdot \rho_c}$$

7. Строят кривую осаждения в координатах $H = f(\tau)$, где H – высота неосветленного слоя жидкости, τ – время осаждения (см. рис. 14).

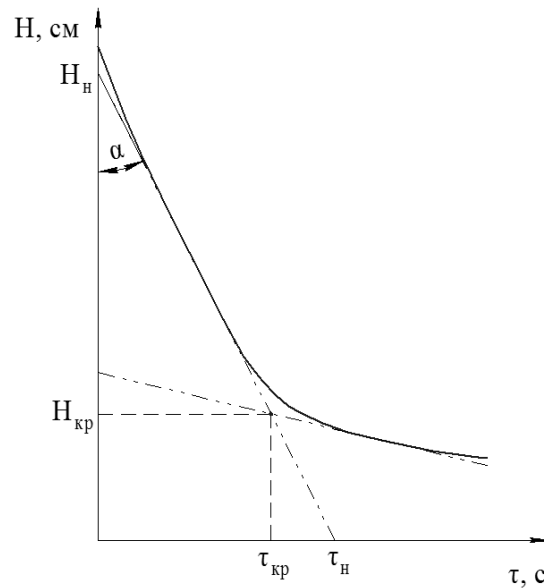


Рис. 14. Кривая осаждения

8. Определяют экспериментальные значения скорости осаждения:

- начальную скорость осаждения как тангенс угла наклона касательной проведенной к начальному участку кривой осаждения α или как отношение отрезков, отсекаемых этой касательной на осях:

$$w_{\text{ос.н}} = \text{tg}\alpha = \frac{H_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}}$$

- скорость осаждения в критической точке как отношение высоты неосветленного слоя ко времени осаждения в точке, полученной при пересечении касательных к начальному и конечному участку кривой осаждения:

$$w_{\text{ос.кр}} = \frac{H_{\text{кр}}}{\tau_{\text{кр}}}$$

6. Делают выводы по проделанной работе, в которых сравнивают результаты 1 и 2 работ, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г	Промежутки измерения, с	Количество реагента, мл	
				коагулянт	флокулянт
1	глина, доломит	10	5	25	2,0
2	мел, доломит	10	5	20	2,0
3	глина, известняк	15	2	15	2,5
4	мел, известняк	15	2	30	2,5
5	доломит, известняк	10	2	20	2,0
6	глина, мел	20	5	25	1,5

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы интенсификации гравитационного осаждения?
2. В чем сущность процесса коагуляции?
3. В чем сущность процесса флокуляции?

4. Какие коагулянты и флокулянты Вы знаете?
5. Какие установки применяют для добавления коагулянтов?
6. Какие установки применяют для добавления флокулянтов?
7. Каким образом совместно применяют коагулянты и флокулянты в промышленности?
8. С какими еще процессами сочетают коагуляцию и флокуляцию?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);

2. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2015. – 79 с. (наличие в библиотеке ВлГУ доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4205/1/01415.pdf>);

3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 362 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429200>);

4. Фирсова Л.Ю. Системы защиты среды обитания. Схемы, сооружения и аппараты для очистки газовых выбросов и сточных вод: учеб. пособие - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. - 80 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367411>).

Лабораторная работа 3. Изучение процесса фильтрации сточных вод

Цель выполнения лабораторной работы

3. Экспериментально определить константы фильтрования;
4. Определить удельное сопротивление осадка и фильтровальной перегородки.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Время от начала опыта	Объем филь- трата	Производительность фильтрующей перего- родки	$\frac{\tau}{V} \cdot 10^{-3}$	$v^2 \cdot 10^6$
$\tau, \text{с}$	$V \cdot 10^3, \text{м}^3$	$v \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{м}^2$	с/м	м^2

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

В соответствии с заданием отбирается проба твердого материала, помещается в смесительную емкость и заливается 550 мл воды и тщательно перемешивается. В емкость помещают термометр и оставляют на 2 – 3 мин для повышения точности измерений. Затем записывают температуру воды и извлекают термометр из емкости.

Из фильтровальной бумаги складывают воронку, которая будет выполнять роль фильтрующей перегородки. Полученную воронку помещают внутрь пластиковой или стеклянной воронки, выполняющей роль корпуса фильтра. На уровне на 1 см ниже верхнего края воронки делают отметку на фильтровальной бумаге. Полученный фильтр располагают в горле конической колбы на 50 мл.

Внутрь воронки заливают суспензию до отмеченного перед началом эксперимента уровня и включают секундомер. Уровень суспензии поддерживают постоянным во время проведения эксперимента, наливая новую порцию суспензии каждый раз, когда её уровень опускается примерно на 1/3 от первоначального. Перед добавлением суспензии в смесительной емкости нужно снова перемешивать, чтобы исключить оседание в ней твердой фазы.

Как только объем фильтрата достигает значения 50 мл, записывают время от начала эксперимента и переносят фильтровальную воронку в другую колбу. Затем полученный фильтрат сливают в ёмкость, предназначенную для сбора фильтрата.

Когда общий объем фильтрата достигает 500 мл эксперимент заканчивают. Остатки воды в воронке аккуратно сливают в ёмкость для сбора фильтрата. Затем распрямляют фильтровальную бумагу и линейкой измеряют среднюю высоту слоя образовавшегося при фильтровании осадка.

После этого выливают остатки суспензии в специальную емкость для слива, а фильтрат в канализацию, осадок и использованную фильтровальную бумагу выкидывают в урну для мусора. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывается площадь поверхности фильтрования (рис. 15):

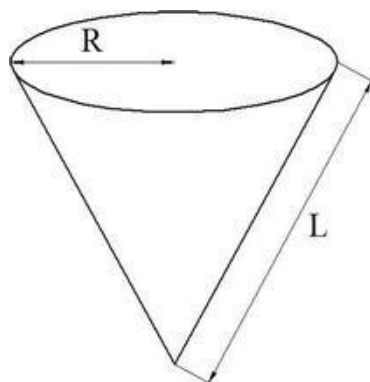


Рис. 15. К расчёту площади поверхности фильтрования

$$F = \pi \cdot R \cdot L,$$

где R – радиус воронки, м; L – длина образующей, м.

2. Рассчитывают производительность фильтрующей перегородки для каждого замера:

$$v_i = \frac{V_i}{F},$$

где V_i – объём фильтрата к i -му моменту времени, м³.

4. Определяют суммарные значения следующих величин по столбцам таблицы результатов эксперимента:

$$\sum_1^n \tau_i; \sum_1^n v_i; \sum_1^n \frac{\tau_i}{v_i}; \sum_1^n v_i^2,$$

где n – количество замеров.

5. Определяют производные константы фильтрования A и B из системы уравнений:

$$\begin{cases} B \cdot n + A \cdot \sum_1^n v_i = \sum_1^n \frac{\tau_i}{v_i} \\ B \cdot \sum_1^n v_i + A \cdot \sum_1^n v_i^2 = \sum_1^n \tau_i \end{cases}$$

6. Рассчитывают аналитические константы фильтрования C и K из следующих соотношений:

$$A = \frac{1}{K}; \quad B = \frac{C}{K}$$

7. По экспериментальным данным строят график зависимости производительности фильтрующей перегородки от времени фильтрования по приведённой ниже методике:

$$\frac{\tau}{v} = f(v)$$

Точка пересечения координатных осей должна располагаться посередине горизонтальной оси (оси значений производительности v).

Между точками экспериментальных данных проводят усреднённую прямую линию таким образом, чтобы по обе стороны этой линии находилось одинаковое количество точек (см. рис. 16).

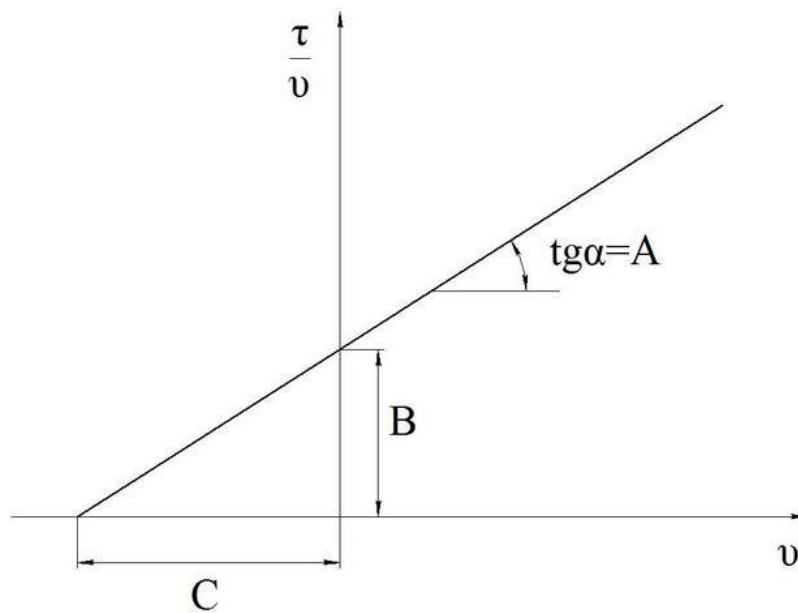


Рис. 16. Графический метод определения констант фильтрования

Усреднённую прямую линию проводят до пересечения с горизонтальной осью. Значение производительности фильтрующей перегородки v в точке пересечения, взятое по абсолютной величине равняется графической константе фильтрования C . Значение величины по вертикальной оси (оси значений τ/v) в точке пересечения с усреднённой прямой равняется производной константе B . Значение графической константы K находят по величинам C и B при помощи приведённой выше формулы.

8. Сравнивают между собой значения аналитических и графических констант фильтрования. Определяют погрешность графического метода по отношению к аналитическому:

$$\Delta C = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}} \cdot 100\%; \quad \Delta K = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max}} \cdot 100\%$$

Аналитическое определение констант с применением метода наименьших квадратов дает более точные значения констант. Поэтому в дальнейших расчетах применяют значениями К и С, найденными аналитически.

9. Рассчитывают отношение объема осадка к объему фильтрата:

$$\gamma = \frac{V_{\text{ос}}}{V_{\text{общ}}} = \frac{h_{\text{ос}} \cdot F}{V_{\text{общ}}},$$

где $h_{\text{ос}}$ – высота слоя осадка, определённая экспериментально, м.

10. Рассчитывают вязкость воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы:

температура t, °С	0	10	20	30	40	50
вязкость $\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования:

$$\mu = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где t_1 – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному; t_2 – значение температуры, ближайшее большее к измеренному; t – измеренное значение температуры; μ_1, μ_2 – значения вязкости воды при температурах t_1, t_2 .

11. Рассчитывают удельное сопротивление осадка:

$$r_{\text{ос}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{K \cdot \mu \cdot \gamma},$$

где Δp – разность давлений над фильтрующей перегородкой и под ней, принимаемая равной 101,3 кПа; μ – вязкость суспензии, принимаемая равной вязкости воды, Па·с.

12. Рассчитывают сопротивление фильтровальной перегородки:

$$R_{\text{ф.п.}} = \frac{C \cdot r_{\text{ос}} \cdot \gamma}{2}$$

13. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г
1	глина	150
2	мел	120
3	известняк	100

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г
4	доломит	120
5	глина	200
6	мел	160

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение и физическая сущность фильтрования?
2. Какие виды неоднородных систем можно разделить фильтрованием?
3. Что является движущей силой процесса фильтрования? Какими способами она создается?
4. Какие фильтровальные перегородки применяются в процессах фильтрования? Какие требования к ним предъявляются?
5. С помощью какого уравнения можно объяснить влияние температуры исходной суспензии на скорость процесса фильтрования?
6. Каков физический смысл удельного сопротивления осадка и сопротивления фильтровальной перегородки?
7. В какое уравнение входят константы процесса фильтрования? Что они характеризуют и какими параметрами определяются?
8. Из чего складывается сопротивление в процессе фильтрования?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие

– Владимир: изд-во ВлГУ, 2015. – 79 с. (наличие в библиотеке ВлГУ доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4205/1/01415.pdf>);

3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 362 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429200>);

4. Фирсова Л.Ю. Системы защиты среды обитания. Схемы, сооружения и аппараты для очистки газовых выбросов и сточных вод: учеб. пособие - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. - 80 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367411>).

Лабораторная работа 4. Изучение процесса адсорбции сточных вод

Цель выполнения лабораторной работы

1. Экспериментально определить константы адсорбции;
2. Исследовать зависимость адсорбции от концентрации растворенного вещества.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

C_n , моль/л	C_k , моль/л	x	x/m	$\lg C_k$	$\lg \frac{x}{m}$

Примечание: пояснения к обозначениям даны в тексте

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

Перед началом работы проверяют, чтобы посуда была вымытой и сухой, четко пронумерованной. В ином случае заменяют посуду, обновляют нумерацию. Также проверяют плотность прилегания пробок к колбам и при необходимости заменяют пробки.

Взвешивают четыре пробы по 10 г глины и каждую помещают в отдельную сухую и пронумерованную колбу. Одновременно готовят 4 водных раствора по 50 мл заданного вещества заданной концентрации C_n . Приготовленные растворы по отдельности помещают в колбы с пробами глины. Затем закрывают колбы пробками и тщательно перемешивают в течении примерно 20 мин с помощью специального встряхивателя или вручную.

После этого из фильтровальной бумаги делают четыре воронки, помещают их внутрь обычных воронок, которые размещают в горлышках следующих четырех сухих и пронумерованных колб. В эти колбы через воронки отфильтровывают содержимое первого набора колб после встряхивания.

Из каждой колбы при помощи пипетки и груши отбирают по 5 мл фильтрата и помещают их в другие сухие и пронумерованные колбы. В каждую колбу с пробой фильтрата помещают по 5 мл аммиачного буферного раствора и 2 – 3 капли индикатора (мурексид).

После этого готовят или используют готовый 0,025 М раствор трилона Б. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им колбы с фильтратом и реактивами. Трилон Б добавляют осторожно по каплям до появления сиреневого окрашивания. После каждого титрования количество трилона Б в бюретке восполняют.

Если титрование какой-л пробы не получается, то повторно отбирают 5 мл из соответствующей колбы с фильтратом, вновь добавляют буферный раствор и индикатор. После чего титруют. Если после третьего повтора результат отрицательный, то сообщают преподавателю и решают возникшие затруднения.

В случае успешного титрования всех четырех проб остатки трилона Б из бюретки сливают в отдельную колбу. Остатки экспериментальных проб из всех колб сливают в специальную емкость для слива. Всю посуду тщательно промывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают конечную концентрацию ионов для каждой пробы:

$$C = \frac{C_{\text{тр.Б}} \cdot V_{\text{тр.Б}}}{V_{\text{пр}}},$$

где $C_{\text{тр.Б}}$ - концентрация трилона Б, равная 0,025 М; $V_{\text{тр.Б}}$ - объем трилона Б, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пр}}$ - объем пробы раствора никеля на титрование, равный 10 мл.

2. Определяют количество адсорбированных ионов для каждой пробы:

$$x = C_n - C_k$$

3. Определяют отношение адсорбированных ионов к массе адсорбента (глины) m :

$$\frac{x}{m}$$

4. Строят изотерму адсорбции, откладывая по оси абсцисс значения C_k , а по оси ординат значение x/m (рис. 17, а).

5. Находят значения для логарифмических соотношений:

$$\lg C_k; \quad \lg \frac{x}{m}$$

6. Для нахождения постоянных адсорбции строят изотерму в логарифмических координатах (рис. 17, б)

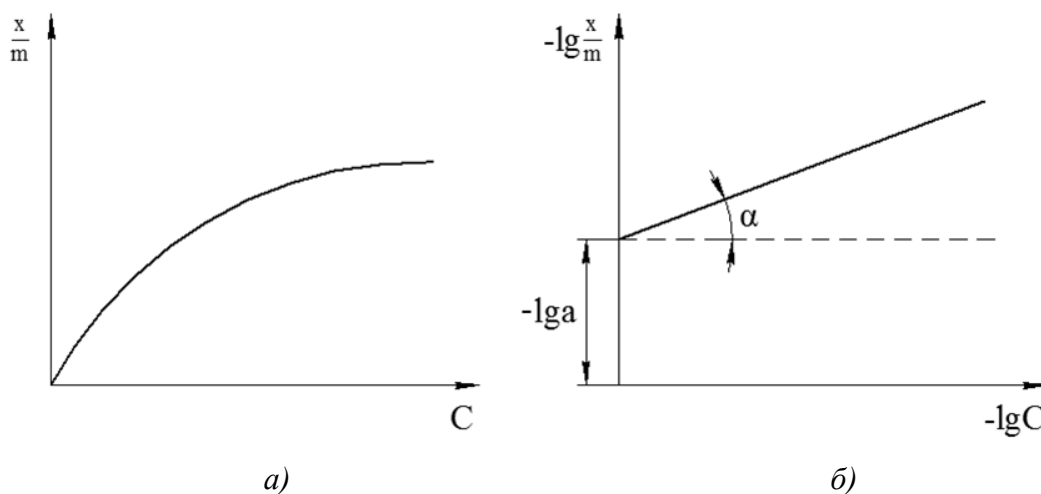


Рис. 17 Изотерма адсорбции: а) в обычных координатах; б) в логарифмических координатах

7. Находят значения постоянных адсорбции a и $1/n$:

$$a = 10^k; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{n}$$

8. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Адсорбируемое вещество	Концентрации адсорбируемого вещества, М	Вариант	Адсорбируемое вещество	Концентрации адсорбируемого вещества, М
1	NiS	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	4	NiS	0,1; 0,2; 0,3; 0,4
2	NiCl ₂	0,1; 0,2; 0,3; 0,5	5	NiCl ₂	0,05; 0,1; 0,2; 0,5
3	NiSO ₄	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	6	NiSO ₄	0,1; 0,2; 0,3; 0,5

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называют процессом адсорбции? Для каких целей он применяется?
2. Что является движущей силой адсорбции? От чего она зависит?
3. От каких факторов зависит адсорбционная емкость?
4. Какие виды адсорбентов Вы знаете?
5. Каким образом можно провести десорбцию адсорбента?
6. Какие промышленные адсорберы Вы знаете?
7. Какими уравнениями описывается кинетика адсорбции?
8. В чем разница между адсорбцией и ионным обменом?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Физико-химические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2016. – 87 с. (наличие в библиотеке ВлГУ);
3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 362 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429200>);
4. Фирсова Л.Ю. Системы защиты среды обитания. Схемы, сооружения и аппараты для очистки газовых выбросов и сточных вод: учеб. пособие - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. - 80 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367411>).

Лабораторная работа 5. Изучение процесса химической нейтрализации сточных вод

Цель выполнения лабораторной работы

1. Определить кислотность и щелочность, концентрации тяжелых металлов (меди) в пробах сточной воды;
2. Провести нейтрализацию проб сточной воды до заданных значений pH. Оценить возможность взаимной нейтрализации проб.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

№ емкости	C_{TM} , моль/л	C_{K} , моль/л	$C_{\text{Щ}}$, моль/л	Нейтрализатор		Полученное pH	$C_{\text{TM.ост}}$, моль/л	η , %	ПДК _{TM}
				вещество	кол-во, мл/100 мл				

Примечание: пояснения к обозначениям даны в тексте

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

Перед началом работы проверяют, чтобы посуда была вымытой и сухой, четко пронумерованной. В ином случае заменяют посуду, обновляют нумерацию.

Из первой емкости с исследуемой сточной водой отбирают пробу 100 мл и помещают в колбу на 250 мл, добавляют 4 – 5 капель индикатора (мурексид). После этого готовят или используют готовый 0,025 М раствор трилона Б. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им пробу сточной воды до изменения цвета. Затем добавляют по каплям аммиак (1:1) до перехода окраски в зеленоватую и продолжают титровать раствором трилона Б до достижения синеватой окраски раствора. Остатки трилона Б сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют содержание ионов металла в пробе:

$$C_{\text{тм}} = \frac{C_{\text{тр.Б}} \cdot V_{\text{тр.Б}} \cdot 1000}{V_{\text{пр}}},$$

где $C_{\text{тр.Б}}$ - концентрация трилона Б, равная 0,025 М; $V_{\text{тр.Б}}$ - объем трилона Б, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пр}}$ - объем пробы сточной воды, равный 100 мл.

После этого из первой емкости с исследуемой сточной водой вновь отбирают пробу 100 мл и помещают в колбу на 250 мл, добавляют 2 – 3 капли фенолфталеина. После этого готовят или используют готовый 0,1 Н раствор NaOH. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им пробу сточной воды до появления слабого розового окрашивания, не исчезающего 1-2 мин. Остатки NaOH сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют кислотность пробы:

$$C_{\text{к}} = \frac{C_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}} \cdot 1000}{V_{\text{пр}}},$$

где C_{NaOH} - концентрация NaOH, равная 0,1 Н; V_{NaOH} - объем NaOH, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пр}}$ - объем пробы сточной воды, равный 100 мл.

Затем из первой емкости с исследуемой сточной водой вновь отбирают пробу 100 мл и помещают в колбу на 250 мл, добавляют 2 – 3 капли метилоранжа. После этого готовят или используют готовый 0,1 Н раствор HCl. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им пробу сточной воды желтой окраски индикатора в розовую, устойчивую в течение 1-2 минут. Остатки HCl сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют кислотность пробы:

$$C_{\text{щ}} = \frac{C_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{HCl}} \cdot 1000}{V_{\text{пр}}},$$

где C_{HCl} - концентрация HCl, равная 0,1 Н; V_{HCl} - объем HCl, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пр}}$ - объем пробы сточной воды, равный 100 мл.

Проводят аналогичную последовательность действий со второй пробой сточной воды.

По результатам определения рассчитывают какой объем кислотной сточной воды потребуется для нейтрализации 50 мл щелочной сточной воды из расчета, что на нейтрализацию 1 моля щелочи будет нужен 1 моль кислоты. Затем смешивают в отдельной колбе 50 мл щелочной и рассчитанное количество кислотной сточных вод. Проводят перемешивание на магнитной мешалке или вручную в течении 2 – 3 мин. После этого проводят измерение рН на рН-метре или иономере. Затем вновь перемешивают колбу в течении 2 – 3 мин и проверяют значение рН содержимого. Так продолжают пока результаты двух замеров не будут одинаковыми.

После этого определяют сколько потребуется заданного реагента на нейтрализацию 50 мл кислотной щелочной воды. Затем смешивают в отдельной колбе 50 мл щелочной и рассчитанное количество кислотной сточных вод. Проводят определение рН по аналогии со взаимной нейтрализацией стоков. Если полученное значение рН < 7, то добавляют в пробу реагент до достижения рН в пределах от 7 до 8. Если полученное значение рН больше 8, то заново отбирают пробу из емкости с кислотной сточной водой и уменьшают изначальное количество реагента до достижения рН в пределах от 7 до 8.

После достижения заданного значения рН из фильтровальной бумаги делают 2 воронки и помещают внутрь обычных воронок, которые размещают в горлышках двух конических колб на 250 мл. В эти колбы через воронки отфильтровывают содержимое нейтрализованных кислотной и щелочной сточных вод. Определяют остаточную концентрацию тяжелого металла (меди) в фильтрах по приведенной выше методике.

Определяют степень извлечения тяжелого металла:

$$\eta = \frac{C_{\text{тм.ост}} \cdot 100\%}{C_{\text{тм}}},$$

где $C_{\text{тм.ост}}$ – остаточная концентрация тяжелого металла, моль/л.

Затем остатки экспериментальных проб из всех колб сливают в специальную емкость для слива. Всю посуду тщательно промывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	№ емкостей сточной воды	Нейтрализатор	Вариант	№ емкостей сточной воды	Нейтрализатор
1	1, 2	NaOH	4	1, 2	Ca(OH) ₂
2	1, 3	Ca(OH) ₂	5	1, 3	NaOH
3	2, 3	NaOH	6	2, 3	Ca(OH) ₂

Примечание: состав и концентрация веществ в исследуемых сточных водах изначально неизвестны студенту и сточные воды готовятся преподавателем и лаборантом заранее

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какими способами проводят нейтрализацию кислотных сточных вод?
2. Какими способами проводят нейтрализацию щелочных сточных вод?
3. Какими способами проводят извлечение ионов тяжелых металлов из сточных вод?
4. Какие реагенты применяют для нейтрализации сточных вод?
5. На каких установках проводится реагентная нейтрализация сточных вод?
6. Какую величину обозначают pH? Чему она должна быть равна для очищенных сточных вод?
7. Какими способами можно повысить степень извлечения тяжелых металлов из сточных вод?
8. С какими методами очистки совмещают химическую нейтрализацию?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Физико-химические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2016. – 87 с. (наличие в библиотеке ВлГУ);
3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 362 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429200>);
4. Фирсова Л.Ю. Системы защиты среды обитания. Схемы, сооружения и аппараты для очистки газовых выбросов и сточных вод: учеб. пособие - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. - 80 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367411>).

Лабораторная работа 6. Изучение процесса химического окисления сточных вод

Цель выполнения лабораторной работы

1. Провести химическое окисление сточной воды хлорированием. Определить основные показатели процесса;
2. Выявить зависимость остаточного хлора от количества добавленного хлора и определить оптимальное вводимого реагента.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Количество добавленного хлора		Количество добавленного KI, г	Объем раствора Na ₂ S ₂ O ₃ на титрование, мл	Остаточный хлор, мг/100 мл
Объем р-ра хлорной извести, мл	Содержание хлора, мг			

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

Перед началом работы проверяют, чтобы посуда была вымытой и сухой, четко пронумерованной. В ином случае заменяют посуду, обновляют нумерацию.

После этого готовят или используют готовый 0,05 Н раствор тиосульфата натрия. Заливают раствор в

В коническую колбу отбирают 10 мл хлорной извести и разбавляют его дистиллированной водой до 100 мл с получением водного раствора (хлорной воды).

В коническую колбу наливают 10 мл водного раствора хлорной извести (хлорную воду), добавляют туда 1 г сухого KI, перемешивают до растворения и добавляют 10 мл 30 % водного раствора CH₃COOH. После этого готовят или используют готовый 0,05 Н раствор

тиосульфата натрия. Когда цвет раствора станет слабо-желтым, прибавляют 1 мл раствора крахмала и продолжают титрование до исчезновения синей окраски. Остатки тиосульфата натрия сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют поправочный коэффициент к титру растворов тиосульфата натрия и содержание хлора:

$$K = \frac{50}{V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}}; \quad C_{\text{Cl}} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1,78 \cdot 1000}{V_{\text{пр.}}},$$

где K – поправочный коэффициент для приведения концентрации раствора тиосульфата натрия точно к 0,05н; $C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ - концентрация тиосульфата натрия, равная 0,05 Н; $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ - объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пр.}}$ - объем пробы сточной воды, равный 20 мл; 1,78 - число миллиграммов хлора, эквивалентное 1 мл 0,05н раствора тиосульфата натрия.

Определение проводят трижды и определяют среднее арифметическое значение величин K и C_{Cl} .

Затем в 8 конических колб на 250 мл отбирают по 100 мл исследуемой сточной воды и добавляют в каждую заданное количество хлорной воды. Колбы закрывают притертыми пробками, ставят в темное место и выдерживают 5 мин при температуре 16-20 °С. Параллельно с этими пробами ставят другие с такими же добавками раствора хлорной воды и выдерживают 1 ч.

По истечении заданного времени в каждую колбу добавляют сухой йодид калия в количестве, зависящем от добавленного количества хлорной воды:

хлорная вода, мл	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KI, г	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

Затем содержимое каждой колбы перемешивают до растворения, подкисляют 10 мл 30% раствора CH_3COOH и титруют по аналогии с приведенной в начале работы методикой.

Затем остатки экспериментальных проб из всех колб сливают в специальную емкость для слива. Всю посуду тщательно промывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают содержание остаточного хлора по формуле, аналогичной определению его начальной концентрации:

$$C_{\text{Cl.ост.}} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1,78 \cdot 1000}{V_{\text{пр.}}},$$

где $V_{пр}$ – объем пробы сточной воды, равный 100 мл сточной воды + количество введенной хлорной воды + 10 мл раствора CH_3COOH .

2. Строят диаграммы зависимости количества остаточного хлора от количества добавленного хлора (рис. 18).

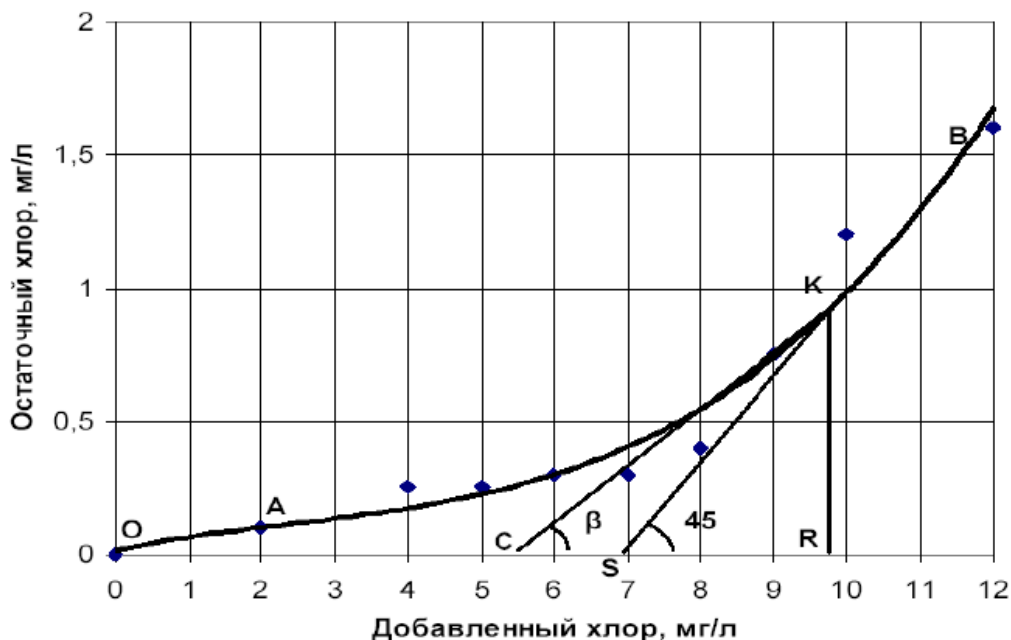


Рис. 18. Кривая определения хлороемкости

Если на диаграмме нет перехода кривой линии в прямую, то недостаточно прибавлен хлор, если отсутствует участок OA, то введено слишком большое количество хлора. Когда исследуемая вода содержит аммиак, аммонийные соли или некоторые органические амины и, когда определение остаточного хлора проводят йодометрическим методом, начальный отрезок кривой может получиться другой формы (рис. 19).



Рис. 19. Кривая йодометрического титрования активного хлора

3. После построения кривых по ним определяют:
- а) длину отрезка ОА - содержание быстро реагирующих с хлором веществ;
 - б) длину отрезка АК - содержание медленно реагирующих с хлором веществ;
 - в) длину отрезка КВ – характеризует отсутствие в конце опыта веществ, реагирующих с хлором;
 - г) длину отрезка ОС - количество хлора, израсходованное на окисление органических веществ и на хлорирование (действительную хлороемкость воды);
 - д) длину отрезка OS = OR-SR - количество хлора, расходуемое на окисление, замещение хлором и на каталитическое разложение;
 - е) длину отрезка OR - прибавку хлора для полноты реакции его с окисляющими и хлорируемыми веществами в воде за время проведения опыта (5 мин или 1,5 ч);
 - ж) длину отрезка CS = OS - ОС – количество хлора, прореагировавшего с водой с образованием кислорода за время проведения опыта;
 - и) площадь треугольника АКС, условно характеризующую замедленность и неполноту происходящих реакций: чем больше площадь, тем медленнее или менее полно проходят реакции в растворе;
 - к) угол β (наклона прямой СВ к оси абсцисс) – характеризует каталитическое разложение хлорноватистой кислоты: $2\text{HClO} = 2\text{HCl} + \text{O}_2$.
4. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	№ емкостей сточной воды	Объем хлорной воды, вводимой в пробы, мл
1	1, 2	1; 2; 4; 5; 6; 7; 8; 10
2	1, 3	1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10
3	2, 3	1; 2; 5; 6; 7; 8; 9; 10
4	1, 2	1; 2; 5; 6; 7; 8; 9; 10
5	1, 3	1; 2; 4; 5; 6; 7; 8; 10
6	2, 3	1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10

Примечание: состав и концентрация веществ в исследуемых сточных водах изначально неизвестны студенту и сточные воды готовятся преподавателем и лаборантом заранее

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие окислители, применяемые для очистки сточных вод Вы знаете?
2. В чем отличие очистки питьевой воды активным хлором от очистки сточных вод?
3. На какой установке проводится окисление сточных вод «активным» хлором?
4. В каких случаях применяют химическое окисление сточных вод?
5. В каких случаях чаще применяют «активный» хлор, чем другие промышленные окислители?
6. Что называют кривой определения хлороемкости? Что по ней можно определить?
7. В чем особенности йодометрического титрования при определении хлороемкости?
8. Для чего нужен поправочный коэффициент при титровании тиосульфатом натрия? Как он определяется?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Физико-химические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2016. – 87 с. (наличие в библиотеке ВлГУ);
3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 362 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429200>);
4. Фирсова Л.Ю. Системы защиты среды обитания. Схемы, сооружения и аппараты для очистки газовых выбросов и сточных вод: учеб. пособие - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. - 80 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367411>).

Лабораторная работа 7. Изучение процесса электролиза сточных вод

Цель выполнения лабораторной работы

1. Провести электрохимическую очистку сточных вод и определить остаточное содержание тяжелого металла (Cr^{6+});
2. Рассчитать основные показатели электрохимической очистки.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Время от начала опыта, с	Напряжение, В	Концентрация Cr^{6+} , мг/л		$\text{Э}_п$	$\text{ВТ}_{\text{общ}}$, %	W , кВт·ч/л
		начальная	остаточная			

Примечание: пояснения к обозначениям даны в методике обработки результатов эксперимента

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Данная работы проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 20.

Перед началом работы проверяется правильность сборки установки и целостность изоляции проводов. Также проверяют, чтобы стакан 1 был пустым чистым и вытерт насухо. При обнаружении неисправности о ней сообщается преподавателю, и она устраняется.

Если установка готова к работе, то в коническую колбу на 250 мл помещают 0,5 г KI, растворяют в 2 мл дистиллированной воды, последовательно прибавляют 5 мл серной кислоты и 10 мл 0,01 н раствора $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Разбавляют полученную смесь водой до 100 мл, закрывают колбу пробкой, перемешивают и ставят в темное место на 5 мин. После этого готовят или используют готовый 0,05 Н раствор тиосульфата натрия. Когда цвет раствора станет слабо-

желтым, прибавляют 1 мл раствора крахмала и продолжают титрование до исчезновения синей окраски.

Определяют поправочный коэффициент для 0,01 н. (0,001 н.) раствора тиосульфата натрия:

$$K = \frac{10}{V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}},$$

где $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ - объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование, мл.

Определение проводят трижды и определяют среднее арифметическое значение величины поправочного коэффициента.

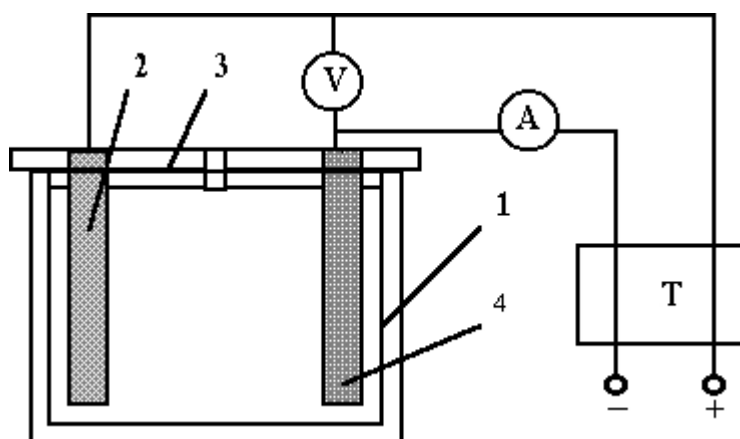


Рис. 20. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Изучение процесса электролиза сточных вод»: 1 – стакан емкостью 250 мл; 2 – катод из стали X18H9T; 3 – крышка с отверстием; 4 – анод из свинца; А – амперметр; V – вольтметр; Т - трансформатор

После этого готовят 200 мл водного раствора $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ с концентрацией, заданной преподавателем. Затем из полученного раствора при помощи пипетки и груши отбирают пробу 10 мл и помещают ее в коническую колбу на 250 мл. В эту колбу также помещают 0,5 г KI и перемешивают до растворения, затем добавляют 5 мл серной кислоты. Разбавляют полученную смесь водой до 100 мл, закрывают колбу и ставят в темное место на 5 мин. После этого титруют содержимое колбы 0,05 Н раствор тиосульфата натрия по аналогии с методикой определения поправочного коэффициента.

Рассчитывают содержание Cr^{6+} :

$$C_{\text{Cr}^{6+}} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1000}{V_{\text{пр.}}}$$

где $C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ - концентрация тиосульфата натрия, равная 0,05 Н; $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ - объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пр}}$ - объем пробы сточной воды, равный 115 мл.

Затем в крышку 3 стакана 1, выполняющего роль электролизера, вставляют воронку и заливают приготовленный раствор. После этого подключают установку к сети и выставляют при помощи трансформатора заданную силу тока. Сила тока должна поддерживаться постоянной в течении всего времени электролиза, которое задается преподавателем. При этом через каждые 15 мин измеряют напряжение, показываемое вольтметром.

После окончания электролиза выставляют силу тока на ноль и отключают установку от сети. Из стакана 1 через отверстие в крышке 3 отбирают пробу в количестве 10 мл и определяют в ней содержание ионов Cr^{6+} по методике, аналогичной определению начального содержания:

$$C_{\text{Cr}^{6+}(\text{ост})} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1000}{V_{\text{пр}}}$$

После титрования сливают пробу и сточную воду из стакана 1 в специальную емкость для слива, промывают стакан 1 серной кислотой и дистиллированной водой в соотношении 1:4, затем промывают дистиллированной водой и насухо вытирают. Сливают остатки тиосульфата натрия из бюретки в отдельную емкость, промывают бюретку, колбы и воронку. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают эффект превращения Cr^{6+} в Cr^{3+} :

$$\Theta_{\text{п}} = 1 - \frac{C_{\text{Cr}^{6+}(\text{ост})}}{C_{\text{Cr}^{6+}}}$$

2. Рассчитывают общий выход по току при электролизе для восстановления Cr^{6+} :

$$\text{ВГ}_{\text{общ}} = \frac{(C_{\text{Cr}^{6+}} - C_{\text{Cr}^{6+}(\text{ост})}) \cdot V_{\text{в}}}{q_{\text{Cr}} \cdot I \cdot \tau} \cdot 100\%$$

где q_{Cr} – электрохимический эквивалент восстановления Cr^{6+} до Cr^{3+} , равный $0,18 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл; I – сила тока при электролизе, А; τ – общее время электролиза, ч; $V_{\text{в}}$ – объем сточной воды, равный 0,2 л.

3. Рассчитывают среднее напряжение при электролизе:

$$U_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n U}{n}$$

где U – величины замеренных напряжений при электролизе, В; n - число замеров при электролизе.

4. Рассчитывают удельный расход электроэнергии на обезвреживание 1 л хромсодержащих стоков:

$$W = \frac{U_{\text{ср}} \cdot I \cdot \tau}{V_{\text{в}} \cdot \Theta_{\text{п}}}$$

5. Делают выводы по проделанной работе, в которых сравнивают результаты 1 и 2 работ, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Концентрация раствора $K_2Cr_2O_7$, %	Сила тока при электролизе, А	Время электролиза, мин
1	5	6	30
2	8	5	40
3	10	4	30
4	12	3	40
5	3	8	30
6	6	6	40

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях проводят очистку сточных вод электролизом?
2. Какие факторы влияют на очистку сточных вод электролизом?
3. На каких установках проводят электролиз сточных вод?
4. Какие величины характеризуют процесс электролиза сточных вод?

5. Какие еще способы электрохимической очистки сточных вод Вы знаете?
6. Какие методы очистки применяют для обезвреживания хромсодержащих сточных вод?
7. Какие процессы происходят при электролизе хромсодержащих сточных вод?
8. Какими методами определяют содержание ионов хрома в сточных водах?

Список литературы

1. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды: учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 412 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429195>);
2. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Физико-химические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2016. – 87 с. (наличие в библиотеке ВлГУ);
3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 362 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=429200>);
4. Фирсова Л.Ю. Системы защиты среды обитания. Схемы, сооружения и аппараты для очистки газовых выбросов и сточных вод: учеб. пособие - М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. - 80 с (доступ по интернет-ссылке <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367411>).