

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»**

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ
ТЕХНОЛОГИИ**

**Часть I. Гидромеханические процессы
Методические указания к лабораторным работам**

Факультет - автоматизированных систем управления
технологическими процессами

Специальности: 240406 – Технология химической переработки древесины
261201 – Технология и дизайн упаковочного производства
280201- Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов
240501 – Химическая технология высокомолекулярных соединений
150405 – Машины и оборудование лесного комплекса
240801 – Машины и аппараты химических производств
220301 – Автоматизация технологических процессов и производств ЦБП
140105 – Энергетика теплотехнологий
080502 – Экономика и управление на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности

Санкт-Петербург

2007

УДК 66.02/07 (076.5)

Процессы и аппараты химической технологии. Часть I.

Гидромеханические процессы: Методические указания к лабораторным работам /Сост. О.А.Кокушкин, В.С.Куров, Г.Ю.Бутко, М.В.Завьялов; Под ред. О.А.Кокушкина; перераб. и доп. -СПб ГТУРП. СПб., 2007. 37 с.: ил.4.

В первую часть методических указаний включены пять лабораторных работ. Для каждой работы дано описание экспериментальной установки, методика проведения эксперимента, обработки опытных данных и выполнения расчета промышленной установки. Предназначаются для студентов, обучающихся по очной, очно-заочной и заочной формам обучения.

Рецензент: канд. техн. наук, проф.кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, Л.М.Исянов.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой процессов и аппаратов химической технологии Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол № 2 от 26 сентября 2006 года).

Утверждены к изданию методической комиссией факультета автоматических систем управления технологическими процессами СПб ГТУРП (протокол № 5 от 16 января 2007 года)

Редактор и корректор Т.А.Смирнова

Технический редактор Л.Я.Титова

Подп. к печати 23.01.07. Формат 60×80/16. Бумага тип №1.

Печать офсетная. Объем 2,5 печ.л., 2,5 уч.-изд.л. Тираж 400 экз.

Изд. №12. Цена “С”. Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

© ГОУВПО Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2007

ВВЕДЕНИЕ

В современной инженерной практике сочетаются теоретические и экспериментальные методы изучения и анализа процессов и аппаратов. Рациональное сочетание этих методов обеспечивает успешное решение задач по проектированию новых и по эффективной эксплуатации существующих установок.

Задачи лабораторного практикума по курсу процессов и аппаратов химической технологии заключается в закреплении и углублении знаний, полученных при изучении теоретической части курса, приобретении навыков экспериментального исследования и применении экспериментальных данных для инженерных расчетов. Лабораторный практикум охватывает основные разделы курса – гидромеханические, тепловые и массообменные процессы. Каждая работа предусматривает детальное ознакомление с экспериментальной установкой, проведение необходимых исследований, обработку полученных опытных данных и выполнение на их основе расчетного задания.

Обработка опытных данных и проведение последующих расчетов проводится только в СИ. Для перевода физических величин из одной системы единиц в другую пользоваться таблицей LVIII [5].

В результате прохождения лабораторного практикума у студентов должны выработаться правильные представления о роли и значении расчетных и экспериментальных методов в инженерной практике.

Методические указания к лабораторным работам состоят из двух частей: в первую включены работы по гидромеханическим, а во вторую – по тепловым и массообменным процессам.

До начала экспериментальной работы студент обязан изучить инструкцию по технике безопасности при работе в лаборатории, разобраться в содержании работы, порядке ее проведения и устройстве установки.

РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА

Цель работы: сравнительная оценка экспериментальных и табличных значений коэффициентов гидравлического трения λ и коэффициентов местных сопротивлений ζ , определение абсолютной шероховатости труб лабораторной установки и расчет полного гидравлического сопротивления Δp_c заданной сети и необходимой мощности N двигателя насоса при перемещении по ней жидкости.

Описание экспериментальной установки

Установка (рис.1.1) состоит из емкости 1; центробежного насоса 2; входного 3 и выходного 4 коллекторов, между которыми расположены трубопроводы 5, 6 и 7 с различными гидравлическими сопротивлениями; пьезометров 14 для измерения статического давления в различных сечениях исследуемых трубопроводов (на схеме показано подключение только двух пьезометров к прямому участку горизонтального трубопровода) и системы противодействия 15, позволяющей устанавливать уровень жидкости в пьезометрах, удобный для снятия показаний. Установка снабжена расходомером 8, вентилями 9 - 13, шаровым клапаном 16 и манометрами 17 и 18.

На установке могут быть смонтированы одновременно три различных участка трубопровода. На рис.1.1 показаны: трубопровод 5 с шестью коленами (угольниками 90°), которые расположены в горизонтальной плоскости (на схеме условно изображены в вертикальной плоскости); прямой участок трубопровода 6 и трубопровод 7 с внезапными расширением и сужением потока.

Вода из емкости 1 центробежным насосом 2 подается в коллектор 3, из которого поступает в один из исследуемых трубопроводов 5-7, после чего через коллектор 4 возвращается в емкость 1. Центробежный насос соединен с двигателем постоянного тока, что позволяет изменять частоту вращения колеса. Это дает возможность варьировать величину создаваемого напора и скорость движения жидкости в трубопроводах, расход которой определяется с помощью расходомера 8 и секундомера. Потери напора при прохождении потока через исследуемые трубопроводы определяются по показаниям

пьезометров, подключенных к различным сечениям трубопроводов. Длина прямого участка трубопровода между точками подсоединения пьезометров p_{10} и p_{11} равна 1,35 м, а его внутренний диаметр - 20 мм. Такой же диаметр (20 мм) у трубопровода с шестью коленами. При внезапном расширении внутренний диаметр трубопровода изменяется с 20 до 70 мм, а при внезапном сужении с 70 до 20 мм.

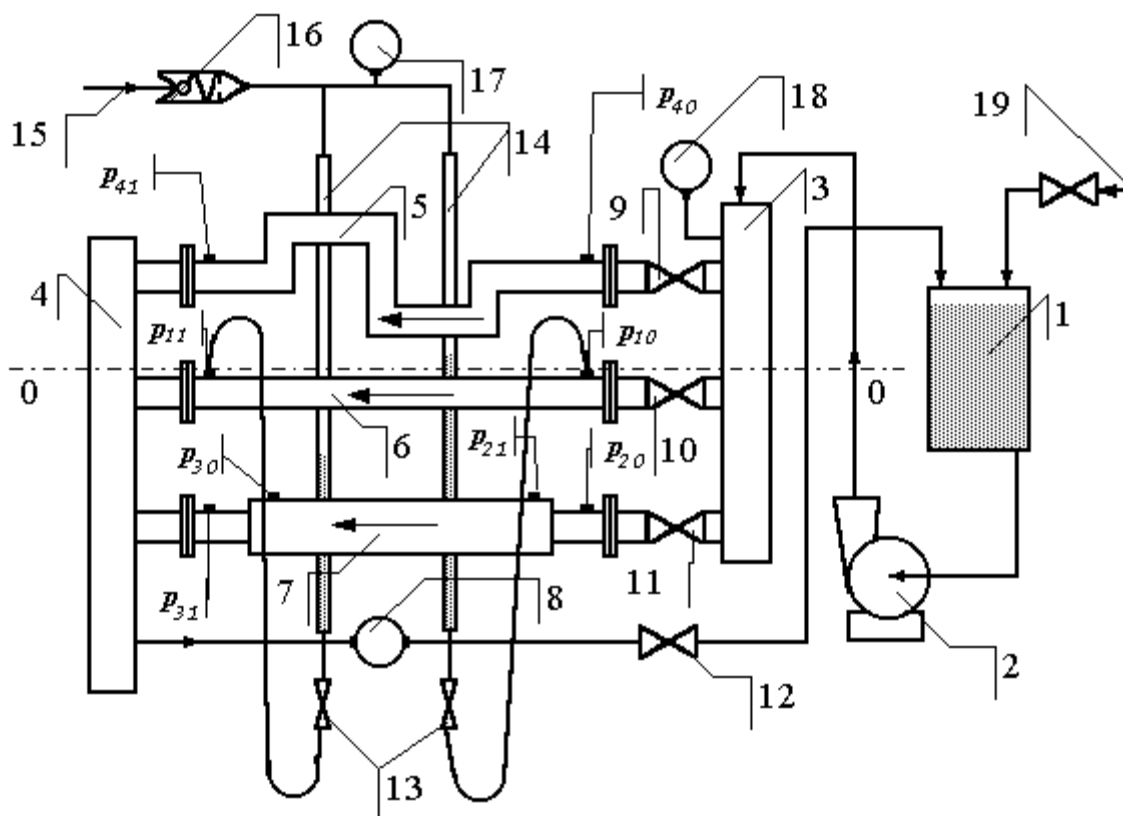


Рис.1.1. Схема экспериментальной установки:
 1-емкость; 2 -центробежный насос; 3 -входной коллектор; 4 -выходной коллектор; 5 -трубопровод с шестью коленами ($\alpha=90^\circ$); 6 -прямой участок трубопровода; 7 -трубопровод с внезапным расширением и сужением потока; 8 -расходомер; 9-13 -вентили; 14 -стеклянные пьезометры; 15 -подача сжатого воздуха; 16 -шаровый клапан; 17 -манометр на воздушной линии; 18 -манометр входного коллектора; 19 -вода из водопровода. p_i - точки подсоединения пьезометров (i -порядковый номер пьезометра). 0-0 - нулевая линия отсчета показаний пьезометров.

Методика проведения работы

Испытание прямого участка трубопровода проводится при пяти различных расходах жидкости, которые измеряют при заданных значениях напряжения тока на автотрансформаторе. Все остальные участки трубопровода исследуются только при одном расходе (по указанию преподавателя или инженера).

Перед пуском установки необходимо заполнить емкость 1 водой из во

допровода 19 (не менее 3/4 ее объема). Ручка автотрансформатора вращением против часовой стрелки приводится в нулевое положение. Вентили 9, 10 и 11 на линиях исследуемых трубопроводов, а также все вентили 13 у пьезометров должны быть закрыты, вентиль 12 - открыт, шаровой клапан 16 соединен с атмосферой.

Пуск установки в работу проводить в следующей последовательности :

1. Включить питание выпрямителя и автотрансформатора.
2. Плавно поворачивая по часовой стрелке ручку автотрансформатора, установить наименьшее из заданных значений напряжения.
3. Открыть вентиль 10 на линии прямого участка трубопровода и через 2-3 минуты с помощью секундомера и расходомера 8 определить время τ_1 , за которое по трубопроводу пройдет $0,1\text{ м}^3$ воды (один оборот большой стрелки).
4. Соединив клапан 16 с линией сжатого воздуха 15, установить по манометру 17 избыточное давление порядка 60 кПа (0,6 ат).
5. Плавно открывая вентиль 13 у пьезометра, соединенного с точкой p_{10} прямого участка трубопровода, наблюдать за изменением уровня воды в нем, не допуская его подъема выше верхней границы шкалы пьезометров. В случае необходимости с помощью клапана 16 увеличить или уменьшить противодавление в системе так, чтобы было удобно проводить замер показаний пьезометра. При установившемся уровне в пьезометре p_{10} плавно открыть вентиль 13 у пьезометра p_{11} . Снять показания h_{10} и h_{11} пьезометров. При этом, если уровень воды в пьезометре выше, нулевой линии отсчета, то его показания записываются со знаком плюс, а если ниже, то со знаком минус.
6. Закрыть вентили 13 у пьезометров p_{10} и p_{11} .
7. С помощью секундомера и расходомера 8 еще раз проверить время τ_2 за которое по трубопроводу пройдет $0,1\text{ м}^3$ воды.
8. Установить следующее из заданных значений напряжения автотрансформатора, и повторить для прямого участка трубопровода в той же последовательности все операции. Провести исследования при всех заданных напряжениях.
9. Аналогично проводятся исследования трубопроводов 5 и 7. При этом должен быть открыт вентиль только исследуемого трубопровода, а показания снимаются с пьезометров присоединенных к точкам данного трубопровода.

В конце работы закрыть вентили 9, 10, 11 и 13, выключить электродвигатель насоса и слить воду из емкости 1. Результаты измерений заносить в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Экспериментальные данные

Участок трубопровода	Время прохождения по трубопроводу 0,1 м ³ воды			Показания пьезометров, мм.в.ст.	
	до проведения замеров, τ_1 , с	после проведения замеров, τ_2 , с	среднее время, τ_{cp} , с		
Прямой участок (не менее 5 замеров)				h_{10}	h_{11}
Участок с шестью коленами				h_{40}	h_{41}
Участок с внезапным расширением				h_{20}	h_{21}
Участок с внезапным сужением				h_{30}	h_{31}

Обработка опытных данных

Для всех пяти значений напряжения, при которых проводился эксперимент на прямом участке трубопровода, последовательно рассчитывают объемный расход V , м³/с; среднюю скорость потока w , м/с; коэффициент гидравлического трения λ и критерий Рейнольдса Re .

Учитывая, что исследования выполнены при установившемся движении жидкости, ее объемный расход равен:

$$V = \frac{V_0}{\tau_{cp}}, \quad (1.1)$$

где V_0 - объем жидкости, м³, прошедшей через расходомер за время τ_{cp} , с.

При измерениях принимали $V_0 = 0,1$ м³. (Внимание! Значение V_0 при проведении эксперимента может быть изменено преподавателем).

Среднюю скорость потока для его конкретного сечения находят из уравнения неразрывности потока для несжимаемой жидкости:

$$w = \frac{V}{F}, \quad (1.2)$$

где $F = \pi d^2 / 4$ - площадь поперечного сечения потока, м²;

d - диаметр трубопровода в конкретном его сечении, м.

Так как для горизонтального участка прямого трубопровода постоянного сечения значения нивелирного напора Z и средней скорости w остаются постоянными в любом его сечении, то уравнение Бернулли потока реальной жидкости для сечений, проведенных через точки замера давлений p_{10} и p_{11} , принимает вид:

$$\frac{p_{10}}{\rho g} = \frac{p_{11}}{\rho g} + h_{mp}, \quad (1.3)$$

где ρ - плотность воды, кг/м³;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

h_{mp} - потерянный напор, м.вод.столба.

Учитывая, что $p_{10}/(\rho g) = h_{10}$, а $p_{11}/(\rho g) = h_{11}$ имеем;

$$h_{mp} = h_{10} - h_{11}. \quad (1.4)$$

Следовательно, потерянный напор определяется как разность показаний пьезометров p_{10} и p_{11} с учетом их знака.

Тогда из уравнения Дарси находим значение коэффициента гидравлического трения:

$$\lambda = \frac{2h_{mp} dg}{lw^2}. \quad (1.5)$$

Величины в формуле (1.5) имеют следующие единицы измерения: $[h_{mp}] = [d] = [l] = \text{м}$; $[g] = \text{м/с}^2$; $[w] = \text{м/с}$.

При расчете критерия Re по формуле 1.21 [5] вязкость воды μ , Па·с, определяют по табл. VI [5] при температуре проведения эксперимента, а плотность воды можно принять равной 1000 кг/м³.

По рассчитанным значениям λ и Re строят график зависимости $\lambda = f(Re)$ и с помощью рис.1.5 [5] оценивают степень шероховатости d/e и рассчитывают величину абсолютной шероховатости e , м.

Внимание! При построении графика не следует соединять между собой экспериментальные точки ломаной линией. Учитывая наличие погрешности при проведении эксперимента, следует провести плавную линию между точками (с наименьшим их разбросом от этой линии), аналогично линиям рис. 1.5 [5] в исследованном диапазоне критерия Re .

Для трубопровода постоянного сечения с горизонтально расположенными шестью коленами, воспользовавшись уравнением Бернулли, найдем величину потерянного напора на участке 6 колен:

$$h_n = h_{40} - h_{41}. \quad (1.6)$$

Для одного колена потерь напор составит: $h_{MC} = h_n / 6$.

Рассчитав для этого трубопровода значения V по формуле (1.1) и w по формуле (1.2), из уравнения Вейсбаха найдем значение коэффициента местного сопротивления для колена ($\alpha=90^\circ$):

$$\zeta_K = \frac{2h_{MC}g}{w^2}. \quad (1.7)$$

Полученное значение следует сравнить с данными табл. XIII [5] для аналогичного вида местного сопротивления. Некоторое отклонение данных можно объяснить различием материала, из которого изготовлены колена, и способа их изготовления.

При внезапном расширении потока горизонтального трубопровода уравнение Бернулли, составленное для двух его сечений проведенных через точки замера давлений p_{20} и p_{21} , принимает вид:

$$\frac{p_{20}}{\rho g} + \frac{w_{20}^2}{2g} = \frac{p_{21}}{\rho g} + \frac{w_{21}^2}{2g} + h_p, \quad (1.8)$$

где $p_{20}/(\rho g) = h_2$ и $p_{21}/(\rho g) = h_6$ - показания пьезометров на участке расширения потока, м; w_{20} и w_{21} - скорости потока в его соответствующих сечениях, м/с, рассчитанные по уравнению (1.2) после определения V по уравнению (1.1); h_p - потерянный напор в местном сопротивлении

Тогда из уравнения (1.8) находим:

$$h_p = (h_{20} - h_{21}) + \frac{w_{20}^2 - w_{21}^2}{2g}. \quad (1.9)$$

Воспользовавшись уравнением Вейсбаха, найдем экспериментальное значение коэффициента местного сопротивления для внезапного расширения трубопровода:

$$\zeta_{pэ} = \frac{2h_p g}{w_{20}^2}. \quad (1.10)$$

При значении критерия $Re > 3500$, рассчитанного для потока с меньшим сечением, определяется теоретическое значение коэффициента местного сопротивления на участке внезапного расширения:

$$\zeta_{pm} = \left(1 - \frac{F_{20}}{F_{21}}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{d_{20}}{d_{21}}\right)^2\right]^2, \quad (1.11)$$

где F_{20} и F_{21} - площади поперечного сечения потока, а d_{20} и d_{21} - их диаметры в точках подсоединения пьезометров p_{20} и p_{21} .

Экспериментальное и теоретическое значения ζ_p , найденные по зависимостям (1.10) и (1.11), сравниваются между собой.

При внезапном сужении потока горизонтального трубопровода уравнение Бернулли, составленное для двух его сечений, проведенных через точки замера напоров h_{30} и h_{31} , принимает вид:

$$\frac{p_{30}}{\rho g} + \frac{w_{30}^2}{2g} = \frac{p_{31}}{\rho g} + \frac{w_{31}^2}{2g} + h_c, \quad (1.12)$$

где $p_{30}/(\rho g) = h_{30}$ и $p_{31}/(\rho g) = h_{31}$ - показания пьезометров на участке сужения потока, м; w_{30} и w_{31} - скорости потока в соответствующих его сечениях (если на участках резкого расширения и сужения исследования проводились при одинаковом объемном расходе, то для данной установки $w_{30} = w_{21}$, а $w_{31} = w_{20}$, м/с); h_c - потери напора на участке сужения потока.

Из уравнения (1.12) имеем:

$$h_c = (h_{30} - h_{31}) + \frac{w_{30}^2 - w_{31}^2}{2g} = (h_{30} - h_{31}) - \frac{w_{31}^2 - w_{30}^2}{2g}. \quad (1.13)$$

Значение коэффициента местного сопротивления, рассчитанное по скорости потока в меньшем сечении, для внезапного сужения потока находим из уравнения Вейсбаха:

$$\zeta_c = \frac{2h_c g}{w_{31}^2}. \quad (1.14)$$

Величины ζ_p и ζ_c следует сравнить с данными таблицы XIII [5]. В отчет о выполненной работе включается график зависимости $\lambda = f(Re)$.

Закончив расчет работы и проанализировав полученные результаты, необходимо выполнить индивидуальное задание: рассчитать полное гидравлическое сопротивление Δp_c заданной сети и необходимую мощность N двигателя насоса при перемещении по ней жидкости. Сеть задается следующими параметрами: объемный расход жидкости V ; ее температура t ; длина трубопровода L ; различные виды местных сопротивлений; материал трубопровода; геометрическая высота подъема жидкости $h_{нод}$; давления в пространствах нагнетания p_2 и всасывания p_1 .

При расчете следует обратить внимание на размерности заданных величин. Расчет проводить в системе СИ.

Примерный порядок расчета

1. В соответствии с табл.1.1 [5] задаться значением средней скорости.
2. Определить диаметр трубопровода по формуле 1.19 [5].
3. Полное гидравлическое сопротивление сети определяется формулой (1.49) [5]. Для этого по рис.1.5 [5] определяют значение коэффициента гидравлического трения, предварительно рассчитав Re , а по табл. XII [5] определив среднее значение шероховатости стенок. Значение λ может быть также рассчитано по одной из приводимых в [5] формул. Значение коэффициентов местных сопротивлений для заданных видов определяются по данным табл. XIII [5].
4. Мощность двигателя насоса может быть рассчитана по формуле 2.3 [5] с учетом, что $\rho gH = \Delta p_c$ и с учетом данных табл.2.1 [5]. При этом общий КПД насосной установки можно принять равным $0,5 \div 0,8$.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается идеальная жидкость от реальной?
2. В чем состоит энергетический смысл основного уравнения гидростатики?
3. Какие силы могут действовать на жидкость?
4. Какие зависимости описывают движение ньютоновских жидкостей?
5. Почему вводится понятие: средняя скорость потока?
6. В чем заключается физический смысл уравнения неразрывности (сплошности) потока?
7. Какой закон устанавливает связь между касательным напряжением и градиентом скорости потока?
8. Какое влияние оказывает изменение температуры на вязкость капельных и упругих жидкостей?
9. В чем заключается энергетический смысл уравнения Бернулли? Что такое геометрический, пьезометрический, динамический и потерянный напоры?
10. Какие жидкости называют неньютоновскими? Как их классифицируют?
11. В чем состоит особенность движения волокнистых суспензий?
12. Какое течение жидкости называют ламинарным, а какое - турбулентным?

13. Как оценить границы различных режимов движения жидкости?
14. Каков физический смысл критерия Рейнольдса?
15. Как определить потери напора по длине трубопровода и в местных сопротивлениях?
16. С помощью каких приборов определяются скорость и расход жидкости?
17. Как определяется коэффициент гидравлического трения при различных режимах движения жидкости?
18. Зачем вводится понятие относительной шероховатости?

Библиографический список

- [1], с.24-25, 51-52, 55-60, 67-69, 71-76, 79-82, 88-89, 92-93, 101-103.
[2], с.23-30, 31-33, 36-50, 54-61, 78-81, 84-95.
[3], с.15-22, 22-24, 30-33, 35-39, 39-42.
[4], с.9, 12-14, 16-17, 18-19, 22-28, 29-33.
[5], глава 1 и справочные данные по рис. 1-5 и табл. XII и XIII.

РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН НА ГИДРАВЛИЧЕСКУЮ СЕТЬ

Цель работы: сравнить экспериментальные рабочие характеристики центробежного вентилятора с графическими зависимостями по литературным данным и графически определить возможность работы исследуемого вентилятора на заданную гидравлическую сеть.

Установка, схема которой изображена на рис.2,1. состоит из центробежного вентилятора 1 с всасывающим 2 и нагнетательным 3 воздуховодами диаметром 100 мм, по оси которых установлены трубки Пито-Прандтля 4 и 5; электродвигателя 6 постоянного тока, который приводит во вращение колесо центробежного вентилятора 1; выпрямителя тока 7 и лабораторного автотрансформатора 8 для регулирования напряжения, подаваемого от сети переменного тока, а следовательно, и частоты вращения колеса центробежного вентилятора 1. Установка снабжена измерительными приборами: микроманометром 9, подсоединенным к трубке Пито-Прандтля 5 для измерения динамического давления в нагнетательном трубопроводе; микроано-

метром 10, подсоединенным к трубкам Пито-Прандтля 4 и 5 для измерения общего (полного) давления, создаваемого вентилятором; амперметром 11 и вольтметром 12 для измерения силы тока и напряжения, подаваемого на клеммы электродвигателя 6, и тахометром 13 для измерения частоты вращения колеса центробежного вентилятора 1. На нагнетательном воздуховоде 3 установлен шибер 14 для регулирования производительности вентилятора.

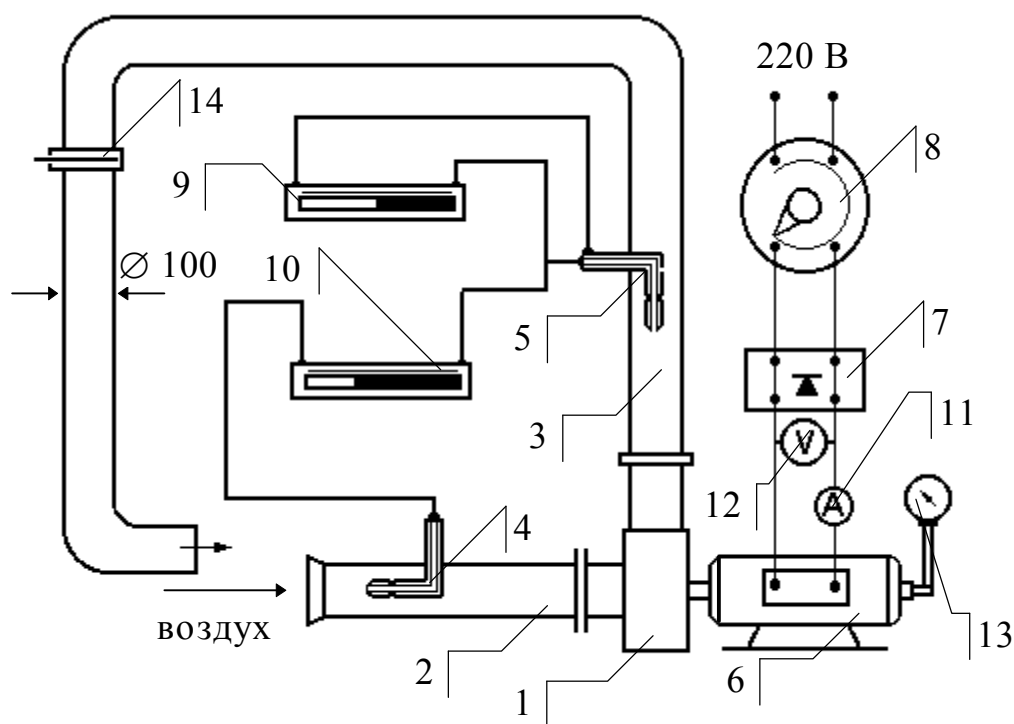


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:

1- вентилятор; 2- всасывающий воздуховод; 3- нагнетательный воздуховод; 4 и 5- трубки Пито-Прандтля; 6- электродвигатель; 7- выпрямитель тока; 8- автотрансформатор; 9 и 10- микроманометры; 11- амперметр; 12- вольтметр; 13- тахометр; 14- шибер.

Методика проведения работы

Для проведения эксперимента на лабораторной установке преподавателем задается значение частоты n вращения колеса вентилятора.

Перед пуском установки в работу убедиться, что шибер 14 на воздуховоде закрыт. Вращением рукоятки трансформатора 8 по часовой стрелке установить по тахометру 13 заданную частоту вращения колеса вентилятора. Система обладает большой инерционностью, поэтому рукоятку вращать очень медленно, не допуская зашкаливания стрелки амперметра 11. При установившейся частоте вращения снимают и записывают в таблицу 2.1 показания микроманометров 9 и 10, амперметра 11 и вольтметра 12.

При изменении положения шибера 14, т.е. при установлении какого-либо расхода по воздуховоду, изменяется и частота вращения колеса вентилятора. Поэтому, установив шибер в первое положение (частично приоткрыв сечение воздуховода), следует восстановить заданную частоту вращения, при которой проводится измерение, и записать новые показания приборов в таблицу. Такие измерения провести еще при четырех положениях шибера. Последнее положение шибера при полностью открытом сечении воздуховода.

Таблица 2.1 Экспериментальные данные

Положение шибера	Общее давление, Δp		Динамическое давление, Δp_{∂}		Сила тока, I	Напряжение U
	мм.в.ст.	Па	мм.в.ст.	Па		
					А	В

В процессе проведения эксперимента, необходимо не забывать при каждом новом положении шибера контролировать соответствие частоты вращения колеса вентилятора заданному значению.

По окончании опытов вывести рукоятку трансформатора 8 на нулевую отметку, вращая ее против часовой стрелки, и отключить установку от сети.

Обработка опытных данных

Для исследованной частоты вращения колеса вентилятора при всех положениях шибера проводят следующие расчеты.

Определяют мощность, потребляемую вентилятором, по формуле;

$$N = I \cdot U, \quad (2.1)$$

где: I - сила тока, А; U - напряжение, В.

По значениям Δp_{∂} , рассчитанным по показаниям микроманометра 9, вычисляют локальную скорость по оси воздуховода:

$$w_{\max} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{\partial}}{\rho_{cp}}}, \quad (2.2)$$

где ρ_{cp} - плотность среды (в данном случае средой является воздух, плотность которого при температуре 20° С и нормальном давлении: $\rho_{cp}=1,22 \text{ кг/м}^3$); Δp_{∂} - динамическое давление, Па.

Считая, что поток в воздуховоде турбулентный, определяют его среднюю скорость:

$$w = 0,8w_{\max}. \quad (2.3)$$

Зная диаметр воздуховода d , м, по уравнению расхода вычисляют объемную производительность вентилятора:

$$V = wS = \frac{\pi d^2}{4} w, \quad (2.4)$$

где S - площадь поперечного сечения воздуховода, м^2 .

Пользуясь показаниями микроманометра 10 для замера общего давления Δp , развиваемого вентилятором, и значениями N и V , рассчитанными по уравнениям 2.1 и 2.4, определяют коэффициент полезного действия вентилятора:

$$\eta = \frac{V\Delta p}{N} \quad (2.5)$$

Все результаты обработки экспериментальных данных заносят в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 Результаты обработки экспериментальных данных

Положение шибера	w_{\max}	w	V	V	N	η
	м/с	м/с	$\text{м}^3/\text{с}$	$\text{м}^3/\text{ч}$	Вт	%

На основании данных таблиц 2.1 и 2.2 на миллиметровку наносят точки и строят рабочие характеристики вентилятора: $\Delta p = f(V)$, $N = f(V)$ и $\eta = f(V)$. Все три кривые изображают на одном графике, имеющем оси ординат с указанием масштабов Δp в Па, N в Вт и η в % и одну ось абсцисс с масштабом V в $\text{м}^3/\text{ч}$. При построении рабочих характеристик следует помнить, что любой эксперимент имеет погрешность, а поэтому, после нанесения на график экспериментальных точек, кривые характеристик проводят при плавном их изменении (точки разбросаны около кривых), аналогично кривым рис. III-6 [2] или рис. 34 [4]. В правом верхнем углу графика указывается частота вращения колеса вентилятора, при которой построены рабочие характеристики.

Определение возможности работы вентилятора на заданную гидравлическую сеть

Закончив обработку экспериментальных данных, следует оценить возможность работы данного вентилятора для перемещения атмосферного воздуха с температурой t в пространство с избыточным давлением $\Delta p_{\text{изб}}$.

Производительность по воздуху равна V . Воздуховод имеет: m - задвижек, k - отводов с радиусом изгиба трубы R_0 и углом поворота φ . Длина воздуховода равна l . Конкретные значения всех величин и их размерность задаются преподавателем в индивидуальном задании.

Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. По таблице 1.1 [5] выбирается среднее значение скорости для воздуха при атмосферном давлении.
2. По формуле 1.19 [5] определяется диаметр воздуховода. Вычисленное значение диаметра округлить до сотых долей метра и по округленному значению диаметра d из той же формулы уточнить значение скорости воздуха в воздуховоде.
3. По рис. VI [5] при заданной температуре найти значение μ коэффициента динамической вязкости воздуха.
4. Плотность воздуха при нормальных условиях дается в таблице V [5], а при рабочих условиях (заданной температуре и атмосферном давлении) рассчитывается по формуле 1.5 [5].
5. По формуле 1.21 [5] рассчитать значение критерия Рейнольдса и оценить режим движения воздуха по воздуховоду.
6. Для труб из кровельной стали по таблице XII [5] найти значение абсолютной шероховатости e стенок труб воздуховода.
7. По значению критерия Рейнольдса и величине обратной относительной шероховатости (d/e) по рис. 1.5 [5] определить значение коэффициента гидравлического трения λ в воздуховоде.
8. Найти значение коэффициентов местных сопротивлений (вход в воздуховод, выход из него, задвижки и отводы) по таблице XIII [5].
9. По формулам 1.35, 1.36 и 1.47 [5] рассчитать значения потерь давления в воздуховоде на создание скорости потока $\Delta p_{ск}$; на трение $\Delta p_{тр}$ и на местные сопротивления $\Delta p_{мс}$.
10. Полное гидравлическое сопротивление сети Δp_c при заданной производительности по воздуху определяется формулой 1.34 [5], в которой при перемещении воздуха $\Delta p_{под} = 0$, а $\Delta p_{дон} = \Delta p_{изб}$.
11. Для графического построения характеристики сети необходимо знать ее гидравлическое сопротивление еще при 3 - 5 значениях производительности по воздуху. Эти точки определяются на основании следующих рассуждений. Если уменьшить или увеличить заданную производительность V в 1,5 или в 2 раза, то скорость воздуха в данном возду-

ховоде, в соответствии с уравнением расхода, также уменьшится или увеличится в 1,5 или в 2 раза, а так как любая из величин $\Delta p_{ск}$, $\Delta p_{тр}$ и $\Delta p_{мс}$ пропорциональна квадрату скорости, то сумма этих значений ($\Delta p_{ск} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{мс}$) при изменении производительности также уменьшится или увеличится в $1,5^2$ или в 2^2 раза, соответственно. Разность же давлений $\Delta p_{дон}$, не связанная со значением скорости потока, остается без изменения при любой производительности.

Все расчеты для определения точек характеристики сети целесообразно оформить в виде следующей таблицы 2.3.

Таблица 2.3 Данные для построения характеристики сети

Производительность по воздуху, Q	$\Delta p_{ск} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{мс}$	$\Delta p_{дон}$	Δp_c , (в соответствии с формулой 1.34 [5])
$\text{м}^3/\text{ч}$	Па	Па	Па
$Q = 1.5 \cdot V$	$A \cdot 1.5^2$	B	$A \cdot 1.5^2 + B$
$Q = V$ (задано)	A (рассчитано)	B (задано)	$A + B$
$Q = V / 1.5$	$A / 1.5^2$	B	$(A / 1.5^2) + B$
$Q = V / 2$	$A / 2^2$	B	$(A / 2^2) + B$
$Q = 0$	0	B	B

В данной таблице значение A равно сумме $\Delta p_{ск}$, $\Delta p_{тр}$ и $\Delta p_{мс}$ при заданной производительности V .

На основании первого и четвертого столбцов данной таблицы построить графическую зависимость для сети $\Delta p_c = f(Q)$, которая представляет собой правильную параболу, выходящую из точки с координатами $Q=0$ и $\Delta p_c = \Delta p_{дон}$. На этот график (в том же масштабе) нанести характеристику вентилятора $\Delta p = f(V)$, полученную при проведении эксперимента. В точке пересечения обеих характеристик, называемой рабочей точкой, определить максимально возможную производительность Q_{max} и максимальное сопротивление сети Δp_{max} , кото

рое сможет преодолеть вентилятор при работе на заданную сеть при исследованной частоте вращения колеса.

12. Применяя законы пропорциональности (формулы 2.8 [5]), определить: \Rightarrow при какой наименьшей частоте вращения колеса вентилятора может быть обеспечена требуемая производительность V при работе на задан-

- ную сеть. При этом $Q_1 = V$, а $Q_2 = Q_{max}$ при частоте вращения вентилятора n_2 , при которой исследовалась работа вентилятора. Таким образом, индексом 1 обозначаются искомые величины, а индексом 2 – известные;
- ⇒ какое давление будет создавать вентилятор при производительности $Q_1=V$ при рассчитанной частоте вращения n_1 . При этом H_2 заменяют на $\Delta p_{max} - \Delta p_{изб}$ и после расчета H_1 определяют $\Delta p_1 = H_1 + \Delta p_{изб}$. Полученное значение Δp_1 сравнить с рассчитанным при заданной производительности сопротивлением сети Δp_c ;
- ⇒ потребляемую вентилятором мощность при производительности $Q_1=V$. Для этого по графику $N=f(V)$ определить при Q_{max} значение $N=N_2$ и рассчитать N_1 .

Контрольные вопросы

1. Какие типы машин по принципу действия применяются для перемещения жидкостей и для перемещения и сжатия газов?
2. Какие основные параметры характеризуют работу машин для перемещения жидкостей и газов?
3. На что затрачивается напор насоса?
4. Какими параметрами определяется высота всасывания насоса?
5. Как высота всасывания насоса зависит от температуры перекачиваемой жидкости?
6. Каков принцип устройства и работы поршневых и плунжерных насосов? Каковы их достоинства и недостатки?
7. В каких конструкциях насосов применяются воздушные колпаки? В чем смысл их работы?
8. Что такое кавитация? В каких средах она возникает?
9. Каков принцип устройства и работы центробежных насосов?
10. От каких параметров зависит теоретический напор центробежных машин?
11. Как определить фактический напор центробежного насоса?
12. Как графически изобразить рабочие характеристики центробежного насоса?
13. Как осуществляется выбор насоса при работе на заданную сеть?
14. Как устроен и работает осевой насос?
15. Как устроен и работает струйный насос?

16. В чем особенности устройства и работы насосов для перемещения волокнистых суспензий?
17. Как устроен и работает центробежный вентилятор?
18. Чем отличается рабочее колесо центробежного вентилятора от рабочего колеса центробежного насоса?
19. С какой целью применяют турбогазодувки и турбокомпрессоры?
20. Как устроена трубка Пито-Прандтля? Как с ее помощью измерить динамическое и полное давление, создаваемые при работе вентилятора?
21. Есть ли отличие в рабочих характеристиках центробежных насоса и вентилятора?
22. Чем отличается универсальная характеристика вентилятора от его рабочих характеристик?
23. Можно ли, зная рабочие характеристики вентилятора при одной частоте вращения колеса, построить рабочие характеристики при другой частоте вращения колеса?
24. Как устроены и работают одноступенчатые поршневые компрессоры? В чем их конструктивное отличие от поршневых насосов? Что представляет собой индикаторная диаграмма работы компрессора?
25. Каковы особенности процесса сжатия в вакуум-насосах? Как устроены и работают водокольцевые и струйные вакуум-насосы?

Библиографический список

- [1], с.73, 124-159.
- [2], с.59, 127-175.
- [3], с.102-176.
- [4], с.50-97.
- [5], главы 1 и 2; справочные данные: табл. I.I, V, XII, XIII, рис. 1-5, VI.

РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ

Цель работы: при проведении эксперимента и последующих расчетов оценить достоинства и недостатки процесса отстаивания; провести анализ кинетических кривых процесса отстаивания; полученные на модельной ус-

тановке данные использовать для расчета промышленного отстойника непрерывного действия заданной производительности: рассчитать требуемую поверхность осаждения, диаметр одноярусного отстойника, а в случае ограничения производственной площади - число ярусов и диаметр многоярусного отстойника, а также минимальный диаметр выделяемых из суспензии твердых частиц.

Описание экспериментальной установки

Исследование процесса отстаивания проводится на модельной установке периодического действия, основная часть которой представляет собой мерный цилиндр емкостью 1 литр, снабженный ручной мешалкой специального типа. Дисперсионная среда - вода, данные о дисперсной фазе указаны на корпусе установки.

Продолжительность процесса отстаивания фиксируется с помощью секундомера, объем уплотненной суспензии определяется по делениям, нанесенным на цилиндре, а высота осветленного слоя жидкости - по шкале, закрепленной на корпусе установки.

С целью более четкого фиксирования границы раздела между уплотненной суспензией и осветленной жидкостью установка снабжена лампой подсвечивания. Лампа включается только на периоды снятия замеров.

Методика проведения работы

Перед началом эксперимента, в случае необходимости добавляя чистую воду, довести объем суспензии в мерном цилиндре до 1 литра и определить температуру t , при которой проводится эксперимент. Перемещая мешалку вверх и вниз и придавая ей вращательное движение, добиться равномерного распределения твердых частиц в суспензии по всей высоте цилиндра. Мешалку опустить вниз и включить секундомер.

Через заданные преподавателем промежутки времени по границе раздела уровня осветленной жидкости и уплотненной суспензии (при включенной подсветке) фиксируется: высота слоя осветленной жидкости h и объем уплотненной суспензии V_c . Результаты измерений заносятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Экспериментальные и расчетные данные

Время, τ	Объем уплотненной суспензии, V_c	Высота осветленной жидкости, h	Порозность уплотненной суспензии, ε
мин	л	мм	-

Обработка опытных данных

По экспериментальным данным построить кинетические кривые $V_c=f(\tau)$ и $h=f(\tau)$. При построении графиков учитывать возможную погрешность эксперимента (некоторый разброс точек по отношению к истинному положению кривых). Поэтому кинетические кривые проводятся плавно между точками. Обратит внимание, что ряд экспериментальных точек (в одном и том же интервале времени на обеих кривых) ложатся на прямые линии. Это участок свободного отстаивания. В дальнейшем идет участок нелинейного изменения - стесненное отстаивание. На полученных кривых обозначить критическую точку, т.е. точку окончания свободного отстаивания.

Кривая изменения высоты осветленного слоя жидкости во времени дифференцируется графическим методом на участке свободного отстаивания и по двум-трем произвольно выбранным точкам на участке стесненного отстаивания на проведенной линии. Графическое дифференцирование проводится следующим образом. К выбранным точкам на кривой $h=f(\tau)$ проводят касательные до пересечения их с осью ординат (касательная и прямая участка свободного отстаивания совпадают). Эти касательные рассматривают как гипотенузы прямоугольных треугольников с катетами Δh и $\Delta \tau$. Значение Δh и $\Delta \tau$ определяются по графику с учетом масштаба осей. При этом Δh выразить в метрах, а $\Delta \tau$ в секундах. Тогда отношение Δh к $\Delta \tau$ даст значение скорости отстаивания w_i в той точке, к которой проведена касательная. Все выполняемые расчеты скорости отстаивания записываются непосредственно на том же листе, на котором построена зависимость $h=f(\tau)$. Определив по графику время в критической точке и в точках, к которым проведены касательные, строят график зависимости скорости отстаивания от времени $w_i=f(\tau)$. Максимальное значение скорости на этом графике (ордината горизонтального участка) отвечает значению скорости свободного отстаивания w_0 в условиях опыта.

Считая, что свободное отстаивание шарообразных частиц из суспензии происходит в ламинарном режиме и при известной скорости свободного отстаивания w_0 , рассчитать минимальный диаметр осаждающихся твердых частиц, применяя формулу Стокса 3.1 [5]; проверить справедливость ее применения, рассчитав критерий Рейнольдса

$$Re_{oc} = w_0 d \rho_c / \mu_0,$$

где d - рассчитанный диаметр шарообразных частиц;

ρ_c и μ_0 - плотность и вязкость дисперсионной среды, т.е. воды.

Значение μ_0 при температуре t_0 определить по табл. VI [5].

Рассчитать массовую долю твердого компонента в исходной суспензии при $V_c = 1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$ ($\tau=0$) по формуле:

$$x_n = 1 / (b_0 + bV_c),$$

где $b_0 = (\rho - \rho_c) / \rho$; $b = \rho_c / m$ - постоянные коэффициенты для данной суспензии в условиях эксперимента;

ρ ; m - плотность и масса твердых частиц, находящихся в суспензии.

При всех значениях объема уплотняемой суспензии рассчитать порозность (объемную долю жидкости в суспензии): $\varepsilon = 1 - \{ m / (\rho V_c) \}$ и построить график $h = f(\varepsilon)$.

Расчет промышленного отстойника

Для расчета промышленного отстойника непрерывного действия в индивидуальном задании преподаватель задает массовую производительность отстойника либо по твердому компоненту G , либо по исходной суспензии G_n , а также температуру суспензии в отстойнике t_n , массовую долю твердого компонента в шламе x_n и максимально допустимый диаметр D отстойника. Массовая доля твердого компонента x_n в исходной суспензии такая же, как в лабораторном эксперименте.

На основании экспериментальных данных определить требуемую площадь осаждения и число ярусов в отстойнике при условии, что диаметр рассчитанного аппарата должен быть меньше заданного диаметра D .

Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Определить вязкость воды при температуре t_n и по формуле Стокса рассчитать скорость свободного отстаивания в промышленном аппарате w_n , предполагая минимальный диаметр осаждаемых частиц равным диаметру

частиц рассчитанному на основании экспериментальных данных. Проверить рассчитанное значение по соотношению $w_n = w_{\varepsilon} \cdot \mu_{\varepsilon} / \mu_n$, которое справедливо для ламинарного движения частицы;

2. По графику $h=f(\tau)$ для критической точки, характеризующей переход от свободного отстаивания к стесненному, найти высоту осветленной жидкости $h_{c\varepsilon}$ и рассчитать время свободного отстаивания в промышленном аппарате $\tau_{c\varepsilon} = h_{c\varepsilon} / w_n$.

3. По заданному значению массовой доли x_k твердого компонента в шламе рассчитать его порозность $\varepsilon = (1 - x_k) / (1 - x_k b_0)$, где b_0 рассчитана ранее.

4. Расчет средней скорости стесненного отстаивания проводят в следующей последовательности:

⇒ рассчитать критерий Архимеда

$$Ar = \left(\frac{gd^3}{\mu_n^2} \right) \rho_c (\rho - \rho_c).$$

⇒ рассчитать критерий Рейнольдса для стесненного отстаивания при ε_k :

$$Re_k = \frac{Ar \cdot \varepsilon_k^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon_k^{4,75}}}.$$

⇒ рассчитать скорость стесненного отстаивания при ε_k : $w_k = \mu_n Re_k / (\rho_c d)$.

Расчет w_k при $\varepsilon_k > 0,7$ можно проводить по эмпирической формуле:

$$w_k = w_n \cdot \varepsilon_k^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon_k)}. \text{ Сравнить результаты расчета.}$$

⇒ рассчитать среднюю скорость на участке стесненного отстаивания:

$$W_{cp} = \frac{(W_n - W_k)}{\ln(W_n / W_k)}$$

5. По графику $h=f(\varepsilon)$ при ε_k определить высоту слоя осветленной жидкости h_k и рассчитать продолжительность стесненного отстаивания для промышленного аппарата $\tau_{cm} = (h_k - h_{c\varepsilon}) / w_{cp}$.

6. Расчетная скорость отстаивания для промышленного отстойника составит: $w_p = h_k / (\tau_{c\varepsilon} + \tau_{cm})$.

7. Необходимая площадь осаждения в промышленном отстойнике (в зависимости от способа задания производительности) составит:

$$F = 1,33 \frac{G_n \left(1 - \frac{x_n}{x_k} \right)}{\rho_c w_p} = 1,33 \frac{G \left(\frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_k} \right)}{\rho_c w_p}$$

где $1,33$ - коэффициент, учитывающий непрерывную работу отстойника.

По рассчитанной площади отстаивания определяется диаметр D_0 одноярусного отстойника. В случае ограничения производственной площади, задаваемой предельно допустимым диаметром отстойника, определяется число ярусов в многоярусном отстойнике $n=(D_0 / D)^2$ с округлением в большую сторону до целого числа. Исходя из равенства $F=nF_0$, определяется площадь отстаивания одного яруса F_0 и диаметр многоярусного отстойника D_n .

Контрольные вопросы

1. Какие виды неоднородных систем можно разделить осаждением?
2. Какие способы осаждения применяют в промышленности?
3. Разностью каких величин определяется движущая сила процесса отстаивания?
4. Чем отличается стесненное отстаивание от свободного?
5. Как записывается уравнение динамического равновесия при свободном отстаивании частиц?
6. По каким критериям можно установить режимы движения частицы в жидкой среде?
7. В чем сложность расчета скорости свободного отстаивания?
8. Как рассчитать скорость свободного отстаивания при ламинарном движении частицы в среде?
9. Как пользоваться для расчета скорости свободного отстаивания обобщенным методом проф. П.В.Лященко?
10. Какие параметры определяют скорость стесненного отстаивания?
11. Влияет ли температура суспензии на скорость процесса отстаивания?
12. В чем достоинства и недостатки процесса отстаивания?
13. Какова последовательность расчета отстойных аппаратов?
14. Как устроены одноярусный и многоярусный отстойники? С какой целью применяют многоярусные аппараты?
15. Какие способы увеличения эффективности осаждения применяют в промышленности? Чем они различаются между собой?
16. Как объяснить повышение эффективности разделения неоднородной системы в циклонных аппаратах меньшего диаметра?
17. Как устроены и работают аэроциклон и батарейный циклон?

18. Как устроены и работают гидроциклон, батарея центриклинеров, ради-клон? В чем достоинства радиклона?
19. Как устроена и работает горизонтальная отстойная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка?

Библиографический список

- [1], с.99-101, 184-190, 192-193, 196-202, 225.
- [2], с. 95-101, 176-181, 183-186, 213-214, 217, 221, 226, 228-233.
- [3], с.196-201, 204-210, 217-221.
- [4], с.36-38, 97-105, 102-105, 107-108, 111-113, 115-117, 138-141, 281-282.
- [5], глава 3, осаждение; справочные данные: табл.VI.

РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДОМ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Цель работы: ознакомиться с методикой расчета фильтровальной установки; экспериментально определить константы фильтрования; рассчитать удельное сопротивление осадка и сопротивление фильтровальной перегородки; применить экспериментальные данные для расчета фильтровальной установки заданной производительности.

Описание лабораторной установки

Исследование процесса фильтрования проводится на модельной (рис.4.1) установке, которая состоит из фильтровальной воронки 1 наливного типа с внутренним диаметром 130 мм; бачка 2 с мешалкой для приготовления суспензии; мерной емкости 3 для сбора фильтрата и вакуум-насоса 4. Установка снабжена U-образным манометром 5 для замера вакуума в мерной емкости 3 и кранами 6, 7, 8 и 9. Отдельные части установки соединены между собой гибкими трубками. С помощью крана 6 в бачок 2 для приготовления суспензии подается вода из городского водопровода. Кран 7 предназначен для поддержания постоянного уровня суспензии в воронке 1. Кран 8 соединяет вакуумную линию с атмосферой и регулирует

величину разрежения в емкости 3 для сбора фильтрата. Кран 9 предназначен для слива фильтрата из емкости 3 после окончания эксперимента.

Фильтровальная воронка 1 разборная; в нее укладывают и закрепляют внутренним цилиндром сменную фильтровальную перегородку, исследуемую в данном опыте.

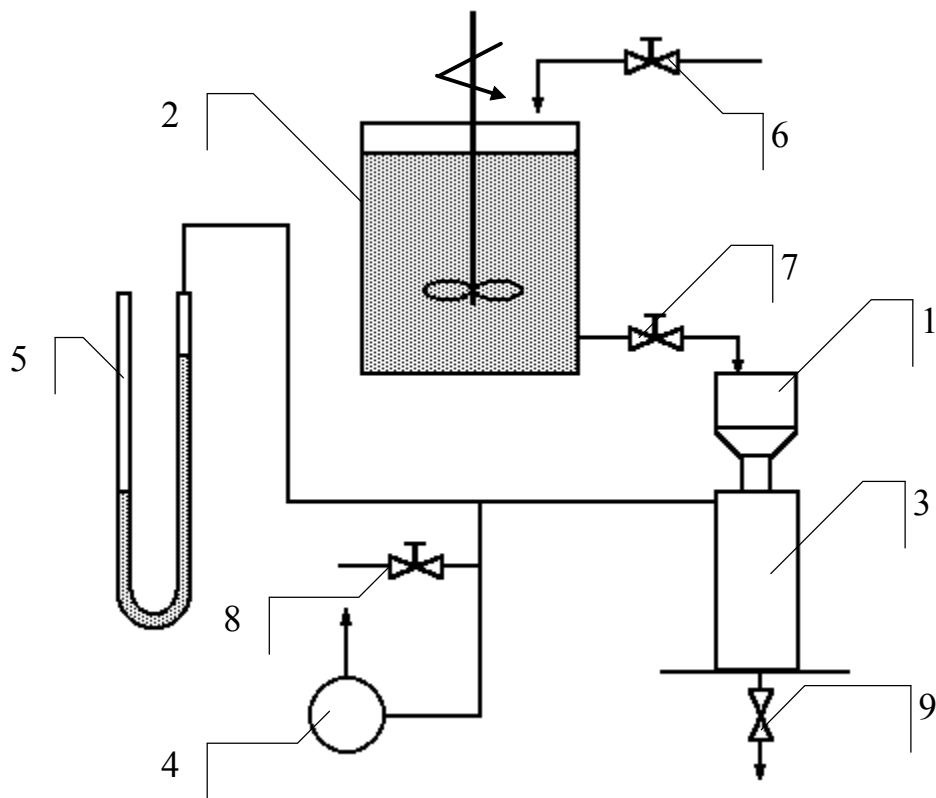


Рис.4.1. Схема экспериментальной установки:

1 -фильтровальная воронка; 2 -бачок с мешалкой для суспензии; 3 - мерная емкость для сбора фильтрата; 4 -вакуум-насос; 5 -U-образный манометр; 6-9 -краны.

Методика проведения работы

Исследование кинетики фильтрации проводится на суспензии, твердые частицы которой при фильтрации образуют несжимаемый осадок. Суспензия приготавливается лаборантом в бачке 2. Равномерное распределение твердых частиц в дисперсионной среде в процессе проведения эксперимента обеспечивается непрерывной работой пропеллерной мешалки.

При вынутom внутреннем цилиндре на перфорированную решетку фильтровальной воронки 1 аккуратно укладывают предварительно смоченный фильтровальный материал, который закрепляется по диаметру вставным внутренним цилиндром. Тип фильтровального материала задается

преподавателем. Собранная воронка устанавливается в гнездо сборника фильтрата 3.

Перед началом эксперимента необходимо убедиться, что кран 9 закрыт, кран 8 приоткрыт, а уровень жидкости в сборнике фильтрата установлен на нулевой отметке. Кроме того, необходимо мысленно (для более быстрого в последующем установления разрежения в мерной емкости 3) зафиксировать отметку уровня воды на одном из колен манометра 5, соответствующую заданной движущей силе процесса. Иначе падает точность эксперимента.

Открыв кран 7, создаем над фильтровальной перегородкой слой суспензии высотой 10÷15 мм (до нанесенной на воронке отметки). Сразу же включают вакуум-насос 4 и, плавно прикрывая кран 8, по показаниям манометра 5 устанавливают заданное преподавателем разрежение в сборнике фильтрата 3, равное движущей силе процесса, которое поддерживают постоянным в течение всего эксперимента.

Одновременно с включением вакуум-насоса 4 включают секундомер. Регулируя краном 7 подачу суспензии в фильтровальную воронку 1, поддерживают принятую ранее высоту слоя суспензии над фильтровальной перегородкой.

При проведении эксперимента следят за изменением уровня фильтрата в сборнике 3 и, не выключая секундомер, записывают в таблицу 4.1 время от начала опыта через каждые 100 мл отобранного фильтрата. Когда объем фильтрата в сборнике 3 достигнет 1 литра, закрывают кран 7 подачи суспензии в фильтровальную воронку 1 и продолжают опыт, наблюдая за уровнем суспензии в воронке. В тот момент, когда вся суспензия над осадком отфильтровалась, выключают секундомер. Вакуум-насос продолжает работать еще секунд 5÷10. При этом через осадок просасывается воздух, несколько его подсушивая. После чего вакуум-насос выключить и записать конечное время фильтрования τ_k и общее количество отобранного фильтрата за время опыта - V_k .

Вынуть фильтровальную воронку 1 из гнезда сборника фильтрата 3, из воронки вынуть внутренний цилиндр и, стараясь не нарушить слой осадка на фильтровальном материале, аккуратно вынимают фильтровальный материал со слоем осадка на нем из воронки и кладут его на горизонтальную поверхность. После чего, применяя специальное устройство, определяют

высоту слоя осадка с точностью до 0,1 мм и температуру суспензии при проведении эксперимента.

Обработка опытных данных

Для определения констант процесса фильтрования K и C необходимо провести обработку всех экспериментальных данных в соответствии с формулами таблицы 4.1:

Таблица 4.1 Обработка результатов эксперимента

τ	$V \cdot 10^3$	$v = V/F$	τ/v	v^2
c	$м^3$	$м^3/м^2$	$с/м$	$м^2$

В таблице - F , площадь поверхности фильтрования в лабораторной установке, рассчитывается по известному внутреннему диаметру вставного цилиндра воронки ($d = 0,13$ м) как площадь круга.

Обработав экспериментальные данные, определяют суммарные значения величин по столбцам таблицы, т.е. находят:

$$\sum_1^m \tau_i; \sum_1^m v_i; \sum_1^m (\tau_i/v_i) \quad \text{и} \quad \sum_1^m v_i^2, \quad \text{где } m - \text{число экспериментально снятых значений.}$$

Константы процесса фильтрования C и K , входящие в интегральное уравнение фильтрования

$$v^2 + C \cdot v = K \cdot \tau. \tag{4.1}$$

находят двумя способами: аналитическим и графическим.

При аналитическом определении констант фильтрования используется известный из математической статистики метод наименьших квадратов. Для этого интегральное уравнение преобразуют к линейному виду:

$$\frac{\tau_i}{v_i} = b_0 + b \cdot v_i,$$

где $b_0 = C / K$ и $b = 1 / K$.

Коэффициенты b и b_0 , находят при решении системы уравнений:

$$b_0 m + b \sum_1^m v_i = \sum_1^m \left(\frac{\tau_i}{v_i} \right)$$

$$b_0 \sum_1^m v_i + b \sum_1^m v_i^2 = \sum_1^m \tau_i$$

Определив значения коэффициентов b и b_0 , рассчитывают константы фильтрования: $K=1/b$ и $C=b_0/b$.

Учитывая большой объем расчетов, обработка экспериментальных данных и определение констант процесса может быть выполнена на ЭВМ.

При графическом способе определения констант на график $(\tau/v)=f(v)$ наносят все экспериментальные точки. В соответствии с линеаризованным интегральным уравнением фильтрования эти точки должны лежать на прямой линии. Следовательно, учитывая погрешность эксперимента, по нанесенным точкам проводят прямую линию и продолжают ее до пересечения с осью абсцисс (ось v). При проведении линии надо стремиться к равномерному разбросу экспериментальных точек вдоль всей длины проводимой прямой линии. Нулевая точка (точка пересечения координатных осей) должна находиться примерно в середине оси абсцисс.

Отрезок, отсекаемый продолжением прямой линии на оси абсцисс, по абсолютному значению в масштабе этой оси (m^3/m^2) равен константе фильтрования C . Отрезок b_0 , отсекаемый прямой линией на оси ординат, в масштабе этой оси равен C/K . Следовательно: $K=C/b_0$.

Аналитически и графически найденные значения констант фильтрования сравнить между собой. Определить погрешность графического метода по отношению к аналитическому. Аналитическое определение констант с применением метода наименьших квадратов дает более точные значения констант. Поэтому в дальнейших расчетах пользоваться значениями K и C , найденными аналитически.

Для расчета удельного сопротивления осадка r_0 и сопротивления фильтровальной перегородки R_{fn} найти значение $\gamma=V_{oc}/V$, где V_{oc} - объем осадка, а V - объем фильтрата, равный V_k , в конце опыта. Так как высота, слоя осадка h экспериментально определена, то $V_{oc}=h \cdot F$ и следовательно:

$$\gamma = \frac{h \cdot F}{V_k},$$

где F - площадь поверхности фильтрования в лабораторной установке.

Не забывайте, что единицы измерения всех величин, подставляемых в формулы, должны быть выражены в СИ.

Определив значение γ , из формулы

$$K = \frac{2\Delta p}{\mu \cdot r_0 \cdot \gamma} \quad (4.2)$$

вычислить значение удельного сопротивления осадка r_0 . Величину Δp , при которой проводился эксперимент, выразить в Па (таблица LVIII [5]); значение вязкости фильтрата μ найти из таблицы VI [5] при температуре проведения опыта.

Значение сопротивления фильтровальной перегородки $R_{\phi n}$ найти из уравнения:

$$C = \frac{2 \cdot R_{\phi n}}{r_0 \cdot \gamma} \quad (4.3)$$

Расчет фильтровальной установки

Рассчитывается число фильтров в установке, оснащенной барабанными вакуумными фильтрами, так как на модельной установке в лаборатории исследовали процесс фильтрования под вакуумом. Считаем, что осадок и фильтровальный материал - несжимаемые. Это означает, что r_0 и $R_{\phi n}$, найденные при проведении опыта, не изменяют своих численных значений при изменении движущей силы фильтрования Δp .

Для расчета установки задаются следующие значения параметров: производительность установки G по сухому веществу; движущая сила фильтрования Δp ; температура t суспензии, поступающей в ванну фильтра; диаметр барабана фильтра D ; его длина L ; степень погружения φ фильтрующей поверхности барабана в ванну с суспензией; частота вращения барабана n и концентрации сухого вещества в исходной суспензии x_c и в осадке x_{oc} .

Последовательность расчета следующая:

1. Определить вязкость фильтрата по таблице VI [5] при заданной температуре исходной суспензии.
2. Рассчитать для промышленной установки объемное соотношение осадка к фильтрату, который получается при образовании данного объема осадка:

$$\gamma = \frac{1 - x_{oc} [1 - (\rho_{\phi} / \rho_m)]}{(x_{oc} / x_c) - 1},$$

где ρ_{ϕ} ; ρ_m - соответственно; плотность фильтрата и плотность твердого компонента в суспензии (в данном случае плотность мела).

3. По формулам 4.2 и 4.3 при значениях Δp , μ , γ для промышленной установки рассчитать константы фильтрования K и C .

4. Время фильтрования при погружении поверхности барабана в ванну с суспензией рассчитывается из уравнения: $\tau \cdot n = \varphi$.
5. Количество фильтрата v , отбираемого с 1 м^2 фильтровальной поверхности промышленного фильтра за время τ , определяется из уравнения 4.1, в котором C и K - значения констант для промышленного фильтра.
6. Рассчитать необходимую поверхность фильтрования всех фильтров в установке по формуле:

$$F_0 = \frac{G \left(\frac{1}{x_c} - \frac{1}{x_{oc}} \right)}{\rho_\phi \cdot v} \cdot \tau .$$

7. Число фильтров в установке определяется как целое число (с округлением в большую сторону) зависимостью:

$$N = \frac{F_0}{\pi DL \cdot \varphi} .$$

Контрольные вопросы

1. Каково назначение и физическая сущность фильтрования? В каких процессах оно используется?
2. Какие виды неоднородных систем можно разделить фильтрованием?
3. Что является движущей силой процесса фильтрования, какими способами она создается?
4. В какой конструкции фильтров, работающих под вакуумом или под давлением, можно получить большую движущую силу? Какое максимальное значение принимает движущая сила в вакуумных фильтрах?
5. Какие фильтровальные перегородки применяют в процессах фильтрования? Каковы требования предъявляемые к ним?
6. С помощью какого уравнения можно объяснить влияние температуры исходной суспензии на скорость процесса фильтрования?
7. Каков физический смысл удельного сопротивления осадка и сопротивления фильтровальной перегородки?
8. В какое уравнение входят константы процесса фильтрования? Что они характеризуют и какими параметрами определяются?
9. Из чего складывается сопротивление в процессе фильтрования?

10. Как рассчитать необходимую поверхность фильтрования и число фильтров в установке?
11. Как устроен и работает барабанный вакуум-фильтр? Какая деталь этого фильтра позволяет чередовать операции на его фильтровальной поверхности? В чем его недостатки?
12. Как устроен и работает напорно-вакуумный фильтр? Каким образом в нем обеспечивается напор и как создается вакуум?
13. Как устроен и работает фильтр воздушного давления?
14. Какие способы съема осадков с барабанных фильтров используются в промышленности?
15. За счет каких величин и параметров можно интенсифицировать процесс фильтрования?
16. Какая конструкция барабанного фильтра позволяет значительно интенсифицировать фильтрование? За счет чего? Как устроен и работает этот фильтр?
17. Как устроен и работает фильтр-пресс автоматический камерный модернизированный (ФПАКМ)?
18. Какой фильтр применяется для фильтрования аэродисперсных систем? Как он устроен? Его основной недостаток.

Библиографический список

- [1], с.174-176, 183-184, 202-208, 210-216, 221-222, 232-234.
- [2], с.101-106, 176-177, 186-210, 233-236.
- [3], с.196-198, 226-241, 251-257, 261-264.
- [4], с.38-39, 97-98, 123-134, 282-285.
- [5], глава 3, фильтрование; справочные данные: табл. VI и LVIII.

РАБОТА №5

РАСХОД ЭНЕРГИИ НА ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Цель работы: экспериментальным путем установить зависимость между критерием мощности и центробежным критерием Рейнольдса для заданного типа мешалки в различных режимах ее работы (аналог научно-исследовательской работы студентов).

Описание лабораторной установки

Установка состоит из сосуда диаметром 270 мм и высотой 430 мм, выполненного из оргстекла, и электродвигателя постоянного тока, расположенного над сосудом, с тахогенератором, позволяющим регулировать частоту вращения мешалки. Уровень воды в сосуде не более 410 мм. Съемные мешалки закрепляются к валу электродвигателя с помощью цангового патрона. Установка снабжена вольтметром и амперметром. В сосуде могут быть установлены четыре отражательные перегородки шириной 40 мм. Исследуется работа мешалок двух типов: пропеллерная $d_m = 90$ мм и турбинная открытого типа $d_m = 150$ мм.

Методика проведения эксперимента.

1. Закрепить в цанговом патроне заданную преподавателем мешалку.
2. Залить в сосуд воду (до указанного уровня) и измерить ее температуру.
3. Медленным вращением ручки тахогенератора (по часовой стрелке) установить начальное напряжение по вольтметру тахогенератора $U_T = (10 - 12)$ В.
4. Снять показания вольтметра U и амперметра J , включенных в электрическую цепь электродвигателя при установившемся режиме работы.
5. Увеличивая каждый раз показания вольтметра тахогенератора на (3–5) В, снять еще 7 – 10 раз показания вольтметра и амперметра электродвигателя. Максимальное напряжение на вольтметре тахогенератора не должно превышать 50 В. Все данные заносить в таблицу 5.1.
6. Плавно поворачивая ручку тахогенератора против часовой стрелки, вывести показания его вольтметра на ноль и отключить питание установки. Слить воду из сосуда.

Таблица 5.1.

№№ п\п	Показания вольтметра тахогенератора, $U_T, В$	Показания вольтметра двигателя, $U, В$	Показания амперметра двигателя, $J, А$
-----------	--	---	---

Обработка экспериментальных данных

1. По показаниям вольтметра тахогенератора рассчитать частоту вращения мешалки (об/мин):

$$n = 25 U_T$$

2. Рассчитать мощность (Вт), потребляемую электродвигателем, при различной частоте вращения мешалки в жидкой среде:

$$N_э = U \cdot J$$

3. Рассчитать мощность холостого хода N_{xx} для всех значений U_T по эмпирической формуле:

$$N_{xx} = 0,312 \cdot U_T + 1,4.$$

4. Рассчитать полезную мощность, потребляемую мешалкой при всех частотах вращения:

$$N_n = N_э - N_{xx}.$$

5. Рассчитать критерий мощности K_N и центробежный критерий Рейнольдса $Re_{ц}$ для всех опытных данных:

$$K_N = \frac{N_n}{\rho n^3 d_m^5}; \quad Re_{ц} = \frac{\rho n d_m^2}{\mu},$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; μ – вязкость воды, Па с, при температуре опыта (табл. VI [5]); n – частота вращения мешалки, об/с; d_m – диаметр мешалки, м.

6. Найти значение $\lg K_N$ и $\lg Re_{ц}$ и заполнить графы табл.5.2.;

Таблица 5.2.

№ п/п	Частота вращения мешалки, n		Мощность, потребляемая электродвиг., N _э	Мощность холостого хода, N _{xx}	Полезная мощность, N _n	Критерий мощности, K _N	lgK _N	Центробежный критерий Рейнольдса, Re _ц ·10 ⁴	lgRe _ц
	об/мин	об/с							
			Вт	Вт	Вт				

7. Найти по рис.V11[5] аналогичный исследуемому тип мешалки, предварительно рассчитав соотношения D/d_m и B/D , где D – диаметр сосуда, а B – ширина перегородок, и обратить внимание на положение линии $K_N=f(Re_{ц})$ в исследованном диапазоне

критериев $Re_{ц}$. Построить по экспериментальным данным график $\lg K_N = f(\lg Re_{ц})$, согласуя ход кривой с данными рис. V11[5]. Рекомендуемые масштабы по осям: для $\lg K_N$ от $-0,1$ до 1 , для $\lg Re_{ц}$ от 4 до 5 , как показано на рис.5.1, на котором представлены возможные положения линий на основе экспериментальных точек. Экспериментальные точки по значению $\lg K_N$ могут иметь и отрицательное значение.

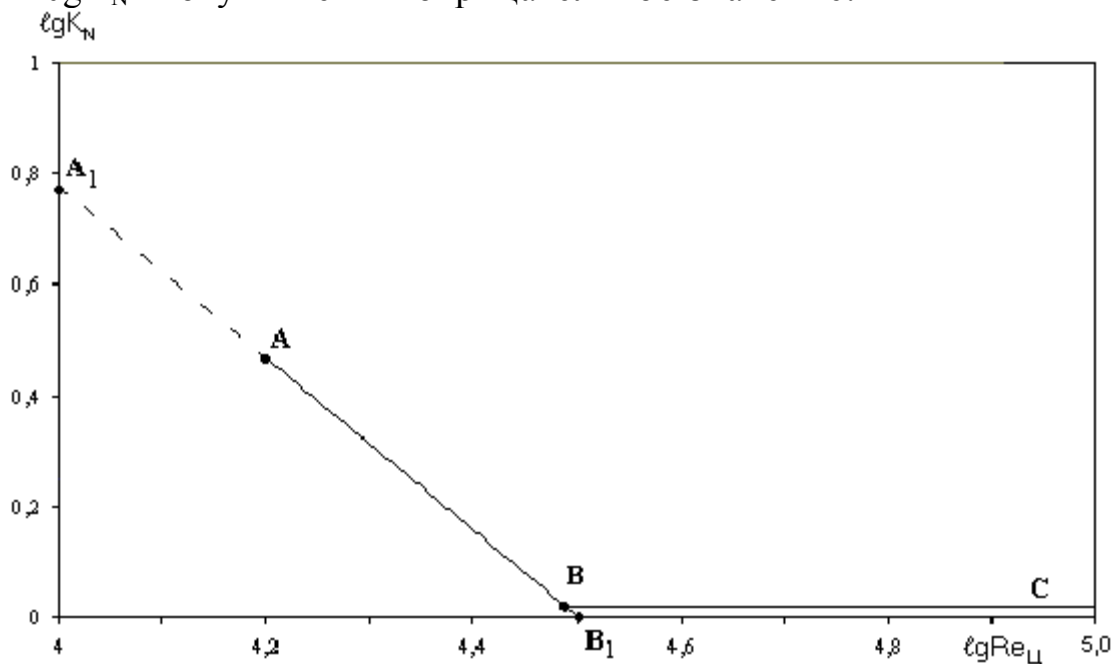


Рис.5.1. Возможные положения экспериментально установленных линий

8. Провести графическую обработку данных для линий АВ и ВС с целью определения коэффициента C и показателя степени m в уравнении $K_N = C/Re_{ц}^m$. С этой целью продлить линию АВ до пересечения с осями координат и определить значение отрезков OA_1 по оси ординат и OB_1 по оси абсцисс. Для рис.5.1. значение отрезка OB_1 равно $(\lg Re_{ц} - 4)$, где $\lg Re_{ц}$ отвечает значению B_1 на оси абсцисс. Тангенс угла наклона этой линии к оси абсцисс численно равен $m = OA_1 / OB_1$. Если бы ось абсцисс была построена от нуля, то линия A_1B_1 отсекала бы на оси ординат отрезок равный $\lg C$. Следовательно значение $\lg C$ можно найти из подобия треугольников:

$$\frac{\lg C}{\lg Re_{ц}} = \frac{OA_1}{OB_1} = m$$

По значению $\lg C$ вычислить C , установить значения $Re_{ц}$, в интервале которых будет справедлива полученная зависимость и записать ее с цифровыми значениями C и m .

Аналогичные рассуждения провести для линии ВС, установив зависимость $K_N=f(Re_{ц})$ и пределы по $Re_{ц}$, в которых она будет справедлива.

Возможны и другие положения прямых линий, отличные от линий на рис.5., но ход рассуждений будет аналогичен изложенному.

Контрольные вопросы

1. Назначение процесса перемешивания.
2. Виды перемешивания. Принципиальные схемы.
3. Основные параметры процесса: интенсивность, эффективность, расход энергии на перемешивание.
4. Расчет эффективности перемешивания.
5. Зависимость эффективности перемешивания от частоты вращения мешалки.
6. Способы устранения воронки.
7. Определение оптимальной частоты вращения мешалки при приготовлении суспензий и эмульсий.
8. Физический смысл критерия Вебера.
9. Определение мощности, потребляемой мешалкой. Критерий мощности.
10. Конструкции механических мешалок (лопастных, пропеллерных, турбинных и специального назначения). Области их применения по вязкости перемешиваемых сред.
11. Какой тип мешалки позволяет увеличить аксиальную составляющую скорости и за счет чего?
12. Какой тип мешалки позволяет увеличить радиальную составляющую скорости потока?

Библиографический список

- [1], с.160 – 173.
[2], с.258 – 273.
[3], с.177 – 192.

[4], с. 152 – 161.

[5], с.109; справочные данные: табл.VI, XXI – XXIV, рис.VII.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коган В.Б., Волков А.Д. Процессы и аппараты целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесная промышленность, 1980. 574 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд. М.: Химия, 1973. 754 с.
3. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х книгах. М.: Химия, 1981. 812 с.
4. Бушмелев В.А., Вольман Н.С., Кокушкин О.А. Процессы и аппараты целлюлозно-бумажного производства. 4-е изд. М.: Лесная промышленность, 1985, 336 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. 10-е изд. Л.: Химия, 1987. 576 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
.....	
РАБОТА № 1. Определение гидравлического сопротивления элементов напорного трубопровода	4
РАБОТА № 2. Исследование работы центробежных машин на гидравлическую сеть	12
.....	
	19
РАБОТА № 3. Исследование процесса разделения суспензий методом осаждения	25
РАБОТА № 4. Исследование процесса разделения суспензий методом фильтрования	32
РАБОТА № 5. Расход энергии на перемешивание в жидких средах	37
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	