

Федеральное агентство по образованию
Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

УДК 621.6(075)
ББК 35.11:30.123я73
Б72

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент Российского
химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева
В. В. Скудин

В. Н. БОБЫЛЁВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ

Учебно-методическое пособие

Москва 2005

Бобылёв В. Н.
Б72 Лабораторный практикум по гидравлике: Учеб.-метод. пособие.
М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. –64 с.

В пособии приведены описания наиболее характерных лабораторных установок, даны рекомендации к выполнению работ и обработке экспериментальных данных в части изучения гидравлики, являющейся базовым разделом курса «Основные процессы и аппараты химической технологии». Пособие снабжено приложением, в котором описаны основные инструменты и приборы, используемые при выполнении лабораторного практикума, приводятся правила обозначения контрольно-измерительных приборов на схемах лабораторных установок, даны сведения об опознавательной окраске трубопроводов. Кроме этого в приложении даны таблицы физических свойств воды и воздуха, являющихся основными средами при лабораторных исследованиях.

Пособие предназначено для студентов химико-технологических специальностей вузов.

УДК 621.6(075)
ББК 35.11:30.123я73

© Бобылёв В. Н., 2005
© Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева, 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Процессы и аппараты химической технологии» имеет большое значение в общеинженерной подготовке студентов химико-технологических специальностей.

Неотъемлемой составной частью этого курса, как и любой другой инженерной дисциплины, является лабораторный практикум. Именно в лаборатории студенты практически знакомятся с сущностью физических явлений, лежащих в основе проведения тех или иных процессов, с аппаратами или с их моделями, в которых осуществляются эти процессы; здесь студенты определяют и устанавливают факторы, влияющие на производительность и экономичность работы установок.

Таким образом, в лаборатории процессов и аппаратов студенты не только знакомятся с практической стороной курса, но и приобретают навыки научного исследования.

В соответствии с общепринятой классификацией основных процессов химической технологии указанный курс разделяется на 3 части: «Основы гидравлики и гидромеханические процессы и аппараты химической технологии», «Теплообменные процессы и аппараты», «Массообменные процессы и аппараты». По каждой из этих частей предусмотрен лабораторный практикум.

Настоящее пособие издаётся как первая часть единого пособия для выполнения лабораторных работ по курсу. Соответственно, здесь приведены описания наиболее характерных лабораторных установок, а также даны рекомендации к выполнению работ и обработке экспериментальных данных в части изучения гидравлики. Нумерация работ, формул и рисунков предваряется цифрой «1» соответственно первой части единого пособия.

Пособие снабжено приложением, в котором описаны основные инструменты и приборы, используемые при выполнении лабораторного практикума, приводятся правила обозначения контрольно-измерительных приборов на схемах лабораторных установок, даны сведения об опознавательной окраске трубопроводов. Кроме этого в приложении даны таблицы физических свойств воды и воздуха, являющихся основными средами при лабораторных исследованиях.

При написании формул учтён стандарт ISO 31-0: 1992 буквенных обозначений физических величин.

Символы, наименования и единицы измерения основных физических величин

A – площадь [поверхности], м^2 ;	t – температура Цельсия, $^{\circ}\text{C}$;
c_p – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;	T – температура термодинамическая, K ;
D – диаметр [аппарата], м ;	U – напряжение, В ;
d – диаметр, м ;	V – объём, м^3 ;
F – сила, H ;	\dot{V} – объёмный расход, $\text{м}^3/\text{с}$;
G – вес, H ;	v – скорость, $\text{м}/\text{с}$;
g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;	α – корректив кинетической энергии;
H – напор, $\text{Дж}/\text{H}$ или м ;	α – коэффициент расхода диафрагмы;
h – высота, м ;	ε – порозность, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
I – сила тока, A ;	ζ – коэффициент [гидравлического] сопротивления;
L – длина, м ;	η – коэффициент полезного действия;
l – линейный размер, м ;	λ – коэффициент [гидравлического] трения;
m – масса, кг ;	μ – динамическая вязкость среды, $\text{Па}\cdot\text{с}$;
\dot{m} – массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$;	ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$;
N – мощность, Вт ;	ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$;
n – частота, с^{-1} ;	ψ – фактор формы, $\text{м}^2/\text{м}^2$.
p – давление, Па ;	
R – сопротивление пористого материала, м^{-1} ;	
r – удельное сопротивление пористого материала, м^{-2} ;	
S – площадь [сечения], м^2 ;	
t – время, с ;	

1.1. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Содержание работы

При течении реальных (вязких) жидкостей в прямых каналах могут наблюдаться два гидродинамических режима, а именно: ламинарный¹, при котором частицы жидкости перемещаются параллельно, не перемешиваясь, и турбулентный², при котором происходит активное перемешивание движущейся жидкости.

Наблюдать за характером течения можно с помощью трассёра (индикатора), которым может быть окрашенная жидкость, имеющая свойства очень близкие к свойствам рабочей жидкости.

В общем случае о режиме течения судят по величине критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{v d_3 \rho}{\mu} = \frac{v d_3}{\nu}, \quad (1.1.1)$$

где v – средняя скорость потока, d_3 – эквивалентный диаметр канала, ρ – плотность жидкости, μ – динамическая вязкость жидкости, ν – кинематическая вязкость жидкости.

На основании многочисленных опытов принято считать, что переход от ламинарного течения к турбулентному в прямом канале происходит при критическом числе Рейнольдса $Re_{кр} = 2300$.

Цель работы: визуальная идентификация режимов течения; экспериментальное определение критического числа Рейнольдса при течении воды в круглом или прямоугольном канале.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.1.

Основными элементами лабораторной установки являются две трубы $T_{кр}$ и $T_{пр}$ длиной по 1200 мм каждая: первая – круглого поперечного сечения внутренним диаметром 25 мм, вторая – прямоугольного поперечного сечения внутренним размером 15×35 мм.

Обе трубы имеют входные раструбы (расширения), способствующие плавному входу жидкости в каналы. Входные участки каналов находятся в успокоительных сосудах C_1 и C_2 ; выходные – в демпфирующей (гасящей скорость жидкости) ёмкости E .

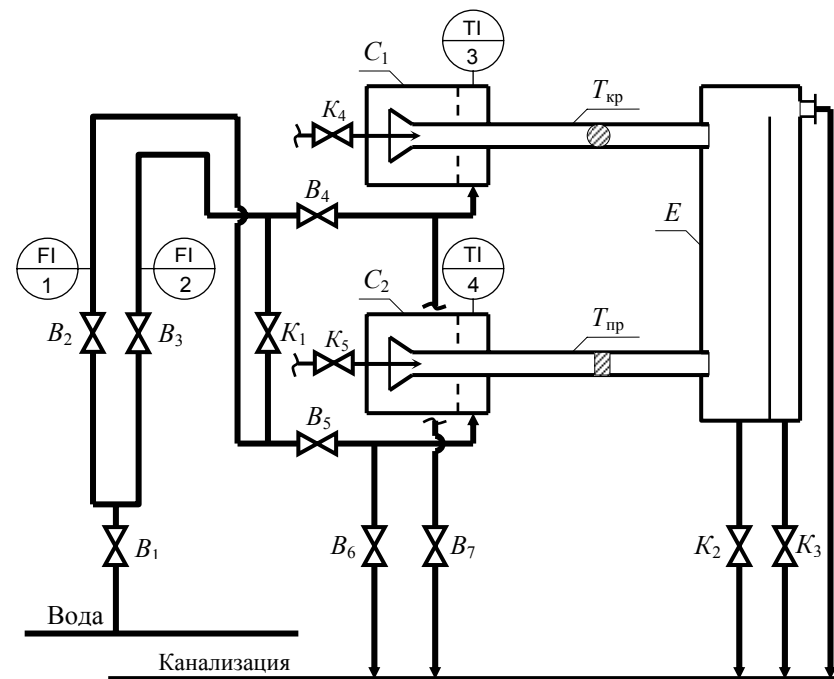


Рис. 1.1. Схема лабораторной установки для изучения режимов течения жидкости

В качестве рабочей жидкости используется вода, подаваемая в установку из водопровода. Расход воды регулируется вентилем B_2 или B_3 и измеряется ротаметрами³ (поз. 1 и 2)⁴.

³ Об устройстве и принципе действия ротаметра – см. с. 54.

⁴ Об условных обозначениях приборов на схемах – см. с. 57.

Ротаметр (поз. 1) предназначен для измерения расхода в диапазоне 0,005...0,045 дм³/с; расход воды через указанный ротаметр определяется по формуле:

$$\dot{V} = 5,02 \cdot 10^{-3} + 3,45 \cdot 10^{-4} s + 5,37 \cdot 10^{-7} s^2, \quad (1.1.2)$$

где \dot{V} – объёмный расход воды, дм³/с;

s – число делений шкалы, обозначенное положением поплавка ротаметра.

Ротаметр (поз. 2) предназначен для измерения расходов более 0,06 дм³/с; расход воды через этот ротаметр определяется по формуле:

$$\dot{V} = 6,14 \cdot 10^{-2} + 3,62 \cdot 10^{-3} s, \quad (1.1.3)$$

где \dot{V} и s обозначают те же величины, что и в формуле (1.1.2).

Для визуализации режима течения используется водный раствор фуксина, подаваемый из напорного сосуда (на рисунке не показан) при открытом кране K_4 или K_5 через тонкие иглы в соответствующие каналы.

Для определения температуры воды в рабочих условиях на сосудах C_1 и C_2 установлены термометры (поз. 3 и 4).

Рекомендации по выполнению работы

При проведении опытов рекомендуется иметь резиновые перчатки, поскольку вентили и некоторые другие детали установки неизбежно запачканы красителем.

1. Перекрыть все краны и вентили на установке и открыть кран K_3 слива воды из установки в канализацию.

Исследование рекомендуется начинать с малых расходов воды, подавая её через ротаметр (поз. 1).

В таком случае:

- при изучении течения в канале круглого сечения полностью открыть вентиль B_4 и открыть кран K_1 ;

- при изучении течения в канале прямоугольного сечения полностью открыть вентиль B_5 ;

Открыть полностью вентиль B_1 подачи воды из водопровода в установку.

2. Приоткрыть вентиль B_2 и установить фиксируемый расход воды в канал.

3. Открыть кран K_4 или K_5 (в зависимости от того, в каком канале изучается течение жидкости) на линии подачи индикатора в поток воды. Визуально отметить характер течения жидкости. Увеличивая или уменьшая расход воды, установить момент перехода режима течения от ламинарного к турбулентному.

4. Отметить температуру воды в установке.

5. По завершении работы закрыть вентили на линиях подачи воды, слить воду из установки и закрыть краны на сливных трубопроводах.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать площадь поперечного сечения и эквивалентный диаметр канала.

2. Определить расход воды, соответствующий точке перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения.

Рассчитать критическую скорость потока ($v_{кр}$).

3. Определить физические свойства воды при температуре опыта и рассчитать критическое число Рейнольдса:

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} d_{э}}{\nu} = \frac{v_{кр} d_{э} \rho}{\mu}. \quad (1.1.4)$$

Измеренные и рассчитанные параметры рекомендуется занести в таблицу:

Форма сечения канала	$S \cdot 10^3$, м ²	$d_s \cdot 10^3$, м	s	\dot{V} , дм ³ /с	$v_{кр}$, м/с	ρ , кг/м ³	μ , мПа·с	$Re_{кр}$

Проанализировать полученное значение критического числа Рейнольдса и сделать выводы по работе.

1.2. ПРОФИЛЬ СКОРОСТЕЙ В СЕЧЕНИИ ТРУБОПРОВОДА

Содержание работы

В зависимости от геометрической формы канала и гидродинамического режима течения жидкости распределение скоростей в поперечном сечении может иметь тот или иной вид (профиль).

Так, например, теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что при ламинарном режиме течения в прямом кругло-цилиндрическом канале распределение скоростей является параболоид вращения. При этом локальная скорость потока у стенки канала (при значении радиуса $r = r_0$, где r_0 – радиус канала) равна нулю, а максимальная скорость наблюдается на оси канала (при $r = 0$); соотношение между средней и максимальной скоростью строго равно 0,5.

При турбулентном режиме течения в том же канале локальная скорость у стенки по-прежнему равна нулю, а максимальное значение скорости – на оси канала, но, благодаря турбулентным пульсациям, в поперечном сечении скорости более выровнены, так что соотношение между средней и максимальной скоростью составляет приблизительно 0,75...0,90.

Для измерения локальной скорости течения жидкости или газа в простейшем случае может быть использовано устройство, называемое «трубка Пито-Прандтля»⁵, работа которого основана на одновременном восприятии как полного (трубкой Пито), так и только статического (трубкой Прандтля) давлений в какой-либо точке потока. Разность этих двух давлений (Δp) эквивалентна динамическому давлению потока в соответствующей точке канала, то есть

$$\Delta p = \frac{\rho_L v_i^2}{2}, \quad (1.2.1)$$

где ρ_L – плотность жидкости; v_i – локальная скорость потока.

Возникающая разность давлений может быть измерена дифференциальным манометром.

⁵ Устройство изобретено в 1732 г. франц. учёным А. Пито (H. Pitot) и усовершенствовано нем. учёным Л. Прандтлем (L. Prandtl).

При этом

$$\Delta p = (\rho_m - \rho_L) g h_m, \quad (1.2.2)$$

где ρ_m – плотность манометрической жидкости;

h_m – высота столба манометрической жидкости в приборе.

Тогда локальная скорость потока в месте установки трубки Пито равна:

$$v_i = \sqrt{2g h_m \frac{\rho_m - \rho_L}{\rho_L}}. \quad (1.2.3)$$

Цель работы: экспериментальное определение локальных скоростей в сечении трубопровода; построение профиля скоростей; вычисление средней скорости потока.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.2.

Основным элементом установки является стеклянная труба T длиной 2 м, имеющая на измерительном участке внутренний диаметр 50 мм.

Через трубу вентилятором B протягивается воздух из лабораторного помещения.

В измерительном сечении трубы T в её стенке имеется 3 отверстия, через которые осреднённое значение статического давления выводится на трубку Прандтля $T_{пр}$.

На верхней кромке трубы T в измерительном сечении расположено специальное устройство, позволяющее измерять динамические давления в разных точках канала.

Устройство включает в себя шток $Ш$ (с винтовой резьбой), с которым жёстко связана трубка Пито $T_{пт}$, и диск $Д$, при вращении которого шток перемещается вверх или вниз. На поверхность штока нанесена шкала, отградуированная в миллиметрах.

При установке штока в «нулевое» положение (по отметке на шкале) отверстие трубки Пито совмещается с осью канала; при установке штока в положение, соответствующее показанию «25 мм» на его шкале, трубка Пито размещается у стенки канала.

Для того чтобы точнее определить местоположение датчика, диск D имеет лыски (плоские срезы боковой поверхности), на которые нанесены условные метки «0», «5», «10» и «15». Один полный оборот диска перемещает шток (а вместе с ним и трубку Пито) ровно на 1 мм.

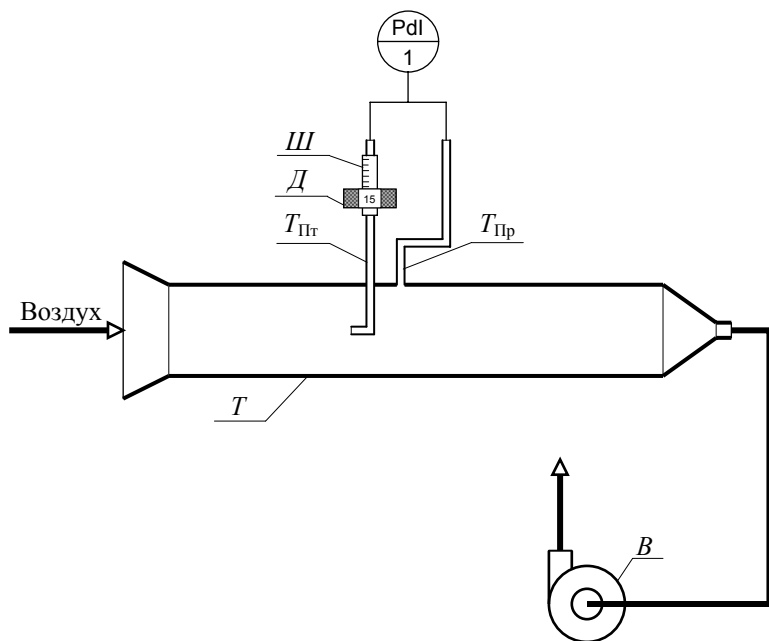


Рис. 1.2. Схема лабораторной установки для определения профиля скоростей в сечении трубопровода

Разность давлений в трубках Пито и Прандтля измеряется дифференциальным манометром (поз. 1).

С целью повышения чувствительности прибора дифференциальный манометр, во-первых, заполнен сравнительно легкой жидкостью (подкрашенным спиртом) и, во-вторых, снабжен наклонной измерительной трубкой. Однако шкала прибора отградуирована в «мм вод. ст.», и, следовательно, плотность манометрической жидкости следует считать равной $\rho_m = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Рекомендации по выполнению работы

1. Установить трубку Пито в исходное положение, при котором открытый конец трубки совмещается с осью канала ($r = 0$).
2. Включить вентилятор, отметить показание дифференциального манометра.
3. Переместить трубку Пито в иное требуемое положение (рекомендуемые местоположения трубки указаны в таблице, приведенной ниже) и зафиксировать соответствующее показание манометра.
4. Завершив накопление информации для построения профиля скоростей, выключить вентилятор.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать локальные скорости потока по формуле (1.2.3).
Необходимое для расчёта по этой формуле значение плотности воздуха можно почерпнуть из таблицы «Физические свойства сухого воздуха» Приложения (см. с. 61).
2. Используя рассчитанные значения, построить график распределения скоростей в сечении трубопровода.
Поскольку профиль скоростей симметричен относительно оси канала, вторую ветвь эпюры можно построить как зеркальное отражение первой.

3. Рассчитать среднюю скорость потока.

Средняя скорость потока определяется выражением:

$$\bar{v} = \frac{1}{S} \int_S v_i dS. \quad (1.2.4)$$

С учетом того, что площадь круга радиусом r_0 равна $S = \pi r_0^2$, а $dS = 2\pi r dr$, можно записать:

$$\bar{v} = \frac{2}{r_0^2} \int_{r=0}^{r=r_0} v_i r dr. \quad (1.2.5)$$

Для численного интегрирования экспериментальных данных может быть использована одна из квадратурных формул, например, формула Симпсона, имеющая вид:

$$\int_{x=a}^{x=b} f(x) dx \approx \left\{ f(x_0) + f(x_{2n}) + 2[f(x_2) + f(x_4) + \dots + f(x_{2n-2})] + \right. \\ \left. + 4[f(x_1) + f(x_3) + \dots + f(x_{2n-1})] \right\} \frac{b-a}{3 \cdot 2n}, \quad (1.2.6)$$

где $2n$ – произвольное число равновеликих отрезков, на которые разбивается весь интервал интегрирования от $x = a$ до $x = b$, так что значения аргумента x_i и соответствующие значения функции $f(x_i)$ фиксируются при значениях $i = 0; 1; \dots; 2n - 1; 2n$.

В данной работе рекомендуется принять $n = 5$; тогда переменная i примет значения $i = 0; 1; \dots; 9; 10$.

Для вычисления интеграла следует по построенному на основе экспериментальных данных графику зависимости локальной скорости от радиуса канала определить значения v_i при удалении от оси канала на величину $r_i = 0,0; 2,5; 5,0; 7,5; \dots 22,5; 25,0$ мм и рассчитать значения функции $f(x_i) = v_i r_i$.

Измеренные и вычисленные значения параметров рекомендуется занести в таблицу:

К построению профиля скоростей				К расчету средней скорости			
i	$r_i,$ мм	$h_m,$ мм	$v_i,$ м/с	i	$r_i,$ мм	$v_i,$ м/с	$v_i r_i,$ (м/с)·мм
1	0			0	0,0		
2	5			1	2,5		
3	10			2	5,0		
4	15			3	7,5		
5	17			4	10,0		
6	19			5	12,5		
7	21			6	15,0		
8	22			7	17,5		
9	23			8	20,0		
10	24			9	22,5		
11	25			10	25,0		

4. Рассчитать число Рейнольдса, соответствующее средней скорости потока, а также соотношение между средней и максимальной скоростью.

Проанализировать полученные данные и сделать выводы по работе.

1.3. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБОПРОВОДА

Содержание работы

Движение реальной жидкости в канале сопровождается потерей (уменьшением) энергии потока. В горизонтальном канале постоянного поперечного сечения потеря энергии проявляется в уменьшении давления ($\Delta p_{\text{пот}}$), которое принято оценивать величиной, пропорциональной динамическому давлению потока. В соответствии с формулой Дарси-Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{пот}, i} = \zeta_i \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1.3.1)$$

где ζ_i – коэффициент пропорциональности, называемый иначе «коэффициент сопротивления» любого i -го элемента гидравлической системы; ρ – плотность жидкости; v – средняя скорость потока.

На прямых участках трубопроводов коэффициент сопротивления ζ_i есть *коэффициент [гидравлического] сопротивления по длине* – $\zeta_{\text{дл}}$. (В литературе по гидравлике он часто называется иначе: *коэффициент сопротивления трения*.) Его, в свою очередь, можно представить величиной, прямо пропорциональной длине участка L и обратно пропорциональной диаметру трубы d , то есть

$$\zeta_{\text{дл}} = \lambda \frac{L}{d}, \quad (1.3.2)$$

где λ – коэффициент Дарси (иначе – коэффициент [гидравлического] трения).

В результате обобщения многочисленных опытных данных установлено, что при турбулентном режиме течения жидкости коэффициент Дарси может быть рассчитан по формулам:

□ при $10 \frac{d}{e} < \text{Re} < 500 \frac{d}{e}$

$$\lambda = \left\{ -2 \lg \left[\left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} + \frac{e}{3,7d} \right] \right\}^{-2}; \quad (1.3.3)$$

□ при $\text{Re} > 500 \frac{d}{e}$

$$\lambda = \frac{0,25}{\left(\lg \frac{e}{3,7d} \right)^2}, \quad (1.3.4)$$

где e – абсолютная шероховатость стенок канала.

В случае, когда потеря энергии происходит только в отдельном месте гидравлической системы, где скорость потока изменяется по величине и/или по направлению, коэффициент ζ_i (см. формулу 1.3.1) есть *коэффициент местного [гидравлического] сопротивления* – $\zeta_{\text{м.с.}}$.

Возникающее изменение давления при преодолении жидкостью того или иного гидравлического сопротивления (Δp_i) может быть измерено индивидуальным дифференциальным манометром, например, U-образным дифманометром. При этом

$$\Delta p_i = (\rho_m - \rho) g \Delta h_i, \quad (1.3.5)$$

где ρ_m – плотность манометрической жидкости;

Δh_i – разность уровней манометрической жидкости в двух коленах U-образного дифманометра, соединённого с i -м элементом гидравлической системы.

Цель работы: ознакомление с устройством трубопроводной арматуры и фитингов; экспериментальное определение коэффициента местного сопротивления одного из устройств, а также коэффициента Дарси на прямом участке трубопровода.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.3.

Основным элементом установки является металлический трубопровод внутренним диаметром $d = 50$ мм. На указанном трубопроводе установлены различные фитинги и арматура, в частности: вентиль нормальный B_n ; вентиль Косва B_K ; кран пробковый K_p . Все указанные элементы трубопроводной арматуры имеют условный

проход диаметром $d_y = 50$ мм. На трубопроводе установлена расходомерная диафрагма D с отверстием диаметром $d_o = 40$ мм. В местах размещения отмеченной арматуры установлены датчики отбора давления. Датчики отбора давления вмонтированы и на прямом участке трубопровода на расстоянии $L = 5,75$ м друг от друга.

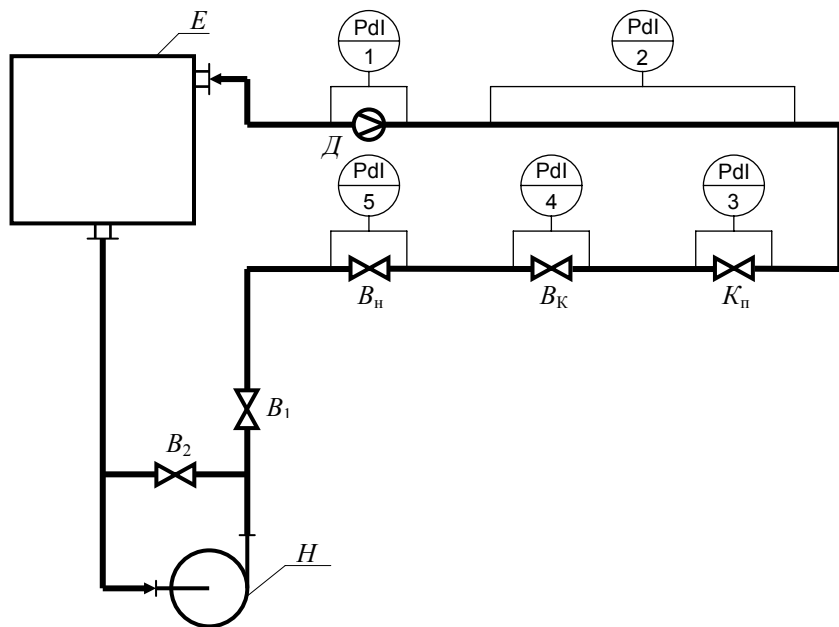


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки для определения гидравлического сопротивления трубопровода

Каждая пара датчиков (до и после того или иного устройства) соединена с индивидуальным дифференциальным манометром (поз. 1...5), выполненным в виде U-образной стеклянной трубки и заполненным манометрической жидкостью — ртутью ($\rho_m \cong 13530$ кг/м³).

В рабочих условиях вода из ёмкости E перемещается по трубопроводу с помощью центробежного насоса H. Расход воды регулируется вентилем B_1 .

Насос снабжён байпасом (обводной линией), по которому при открытом вентиле B_2 часть жидкости из нагнетательной линии возвращается во всасывающую.

Параллельно металлическому трубопроводу в лаборатории расположен стеклянный трубопровод внутренним диаметром 56 мм, также снабженный арматурой и фитингами. Гидравлические сопротивления некоторых из них, а именно: вентили Косва; вентили прямоточного; сужения трубопровода от 45 до 35 мм; колена, выполненного из трубы диаметром 35 мм; мерной диафрагмы с отверстием диаметром 30 мм,— измеряются индивидуальными дифференциальными манометрами.

В рабочих условиях по стеклянному трубопроводу перемещается вода с помощью того же насоса H.

Рекомендации по выполнению работы

1. Отметить исходные уровни манометрической жидкости в коленах дифференциальных манометров.
2. Закрыть вентили B_1 и B_2 .
3. Включить привод насоса; полностью открыть вентиль B_1 , создав максимальный расход воды по трубопроводу; отметить разность уровней манометрической жидкости в коленах дифференциальных манометров.
4. Уменьшить расход воды в трубопроводе, приоткрыв вентиль B_2 на байпасе; отметить соответствующие разности уровней манометрической жидкости в коленах дифманометров.

При необходимости продолжить измерения, изменяя расход воды в трубопроводе.

5. Завершив экспериментальную часть лабораторной работы, выключить привод насоса.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Определить скорость воды в трубопроводе.

При известном коэффициенте сопротивления *диафрагмы* $\zeta_{\text{диаф}}$, а также пропорциональной ему величине – коэффициенте расхода диафрагмы (α), измеряемое изменение давления в этом месте трубопровода связано со скоростью выражением:

$$\Delta p_{\text{диаф}} = \frac{1}{\alpha^2} \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1.3.6)$$

откуда искомая скорость воды в трубопроводе рассчитывается по формуле:

$$v = \alpha \frac{d_o^2}{d^2} \sqrt{2 g \Delta h_{\text{диаф}} \frac{(\rho_m - \rho)}{\rho}}. \quad (1.3.7)$$

В формуле (1.3.6) S и S_0 – соответственно площади сечений трубопровода и отверстия в диафрагме.

2. Используя найденное значение скорости, определить коэффициент сопротивления обследуемого устройства из формулы (1.3.1) и коэффициент Дарси на прямом участке трубопровода из формулы (1.3.2).

Экспериментальные и рассчитанные данные внести в таблицу:

№ опыта	Диафрагма			[*]			Прямой участок		
	$\Delta h_{\text{дф}}$, см рт. ст.	$\Delta p_{\text{дф}}$, Па	v , м/с	$\Delta h_{\text{м.с.}}$, см рт. ст.	$\Delta p_{\text{м.с.}}$, Па	$\zeta_{\text{м.с.}}$	$\Delta h_{\text{дл}}$, см рт. ст.	$\Delta p_{\text{дл}}$, Па	λ
1									
2									
3									

[*] – указать вид местного сопротивления, заданного к обследованию преподавателем.

Полученное экспериментально значение коэффициента местного сопротивления сопоставить со значением, опубликованным в справочной литературе [6], а коэффициента Дарси – со значением, рассчитанным по формуле (1.3.3) или (1.3.4), принимая абсолютную шероховатость стенок трубы $e = 2/3$ мм.

Проанализировать полученные данные и сделать выводы по работе.

1.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Содержание работы

Характеристиками гидравлической машины для перемещения жидкости – насоса динамического типа – являются зависимости: напора, сообщаемого насосом жидкости (H), мощности на валу насоса (N_n) и коэффициента полезного действия насоса (η_n) от подачи (или, что то же самое, объёмного расхода – \dot{V}) при постоянной частоте вращения (n) рабочего колеса машины.

В соответствии с «уравнением Бернулли» для целого потока реальной жидкости напор может быть найден по формуле:

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2}{2g} + h + H_{\text{пот}}, \quad (1.4.1)$$

где p – давление; ρ – плотность перекачиваемой жидкости; v – скорость потока; α – корректив кинетической энергии (при турбулентном режиме течения $\alpha \approx 1,1$); h – высота подъёма жидкости от «точки 1» до «точки 2»; $H_{\text{пот}}$ – потеря напора. Индексы «1» имеют гидравлические параметры жидкости в «точке 1», являющейся центром поперечного сечения потока до насоса, а индексы «2» – в «точке 2», являющейся центром поперечного сечения потока после него.

Если давление до насоса измеряется вакуумметром, а давление после насоса измеряется манометром, и при этом точки подсоединения этих приборов к гидравлической системе находятся в непосредственной близости от самого насоса (например, «точка 1» – у всасывающего патрубка, а «точка 2» – у нагнетательного), то искомый напор

$$H = \frac{p_{\text{ман}} + p_{\text{вак}}}{\rho g} + \frac{\alpha_n v_n^2 - \alpha_{\text{вс}} v_{\text{вс}}^2}{2g} + h_o, \quad (1.4.2)$$

где $p_{\text{ман}}$ – избыточное давление в нагнетательном патрубке насоса (по показаниям манометра); $p_{\text{вак}}$ – разрежение во всасывающем патрубке (по показаниям вакуумметра); v_n и $v_{\text{вс}}$ – скорости соответственно в линии нагнетания и всасывания; h_o – расстояние по

вертикали от точки присоединения вакуумметра к трубопроводу до центра манометра.

Полезная мощность, или энергия, сообщённая насосом перекачиваемой жидкости за единицу времени, вычисляется по формуле:

$$N_{\text{пол}} = \dot{V} \rho g H, \quad (1.4.3)$$

а коэффициент полезного действия насоса (η_n) определяется выражением:

$$\eta_n = \frac{N_{\text{пол}}}{N_n}, \quad (1.4.4)$$

где N_n – мощность на валу рабочего колеса насоса.

Цель работы: экспериментальное определение характеристик центробежного насоса и их графическое отображение.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.4.

Основным элементом установки является центробежный насос H , рабочее колесо которого приводится во вращение электродвигателем постоянного тока.

Рабочая жидкость – вода – перекачивается насосом из резервуара P , расположенного ниже уровня пола, в ёмкость E по трубопроводу, состоящему из линии всасывания размером $\varnothing 49 \times 5,5$ мм и линии нагнетания размером $\varnothing 43 \times 5,5$ мм. Линия всасывания оборудована обратным клапаном K , предотвращающим сток жидкости из неработающего насоса в резервуар P .

На линии всасывания установлен вакуумметр (поз. 1); на линии нагнетания установлен манометр (поз. 2).

Расход перекачиваемой жидкости регулируется вентилем B_1 .

Для измерения расхода воды приёмная ёмкость E оборудована водомерным стеклом (поз. 3), снабжённым шкалой, отградуированной в «дм³».

Во избежание переполнения ёмкость E оборудована линией перелива воды обратно в резервуар P .

Слив воды из заполненной ёмкости E осуществляется также в резервуар P .

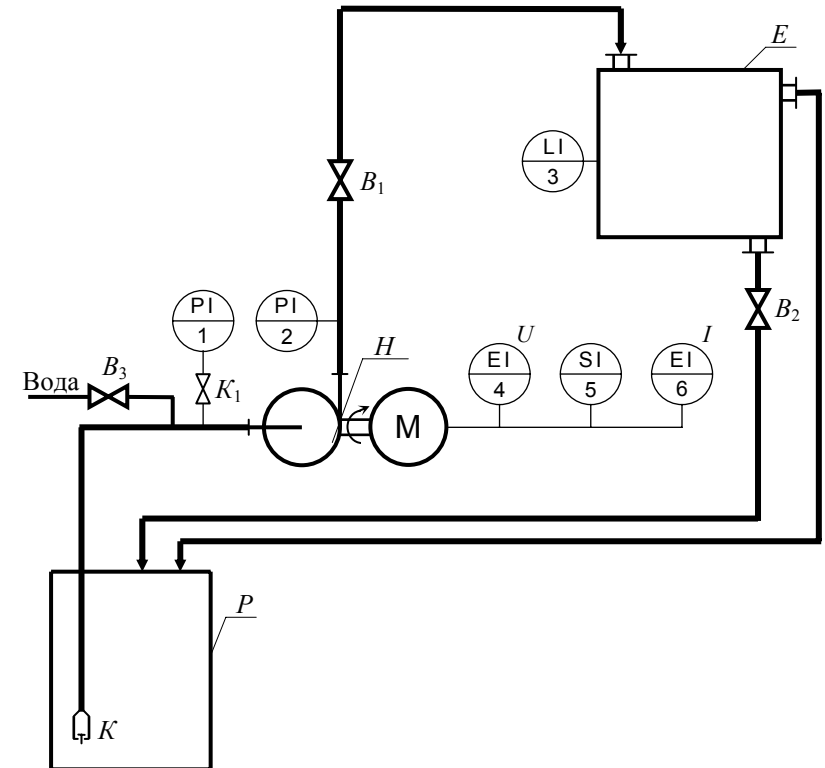


Рис. 1.4. Схема лабораторной установки для определения характеристик центробежного насоса

Для измерения энергопотребления двигателем насоса установка оборудована вольтметром (поз. 4) и амперметром (поз. 6).

Частота вращения рабочего колеса насоса регистрируется тахометром (поз. 5).

Рекомендации по выполнению работы

Перед началом работы необходимо убедиться, что ёмкость E свободна от воды. В противном случае открыть вентиль B_2 и слить воду в резервуар P до полного опорожнения ёмкости.

1. Закрыть вентили B_1 и B_2 , а также кран K_1 на линии соединения вакуумметра с всасывающим трубопроводом.

2. Заполнить насос водой из водопровода, для чего открыть на непродолжительное время вентиль B_3 .

3. Установить ручку реостата, регулирующего частоту вращения ротора электродвигателя, в крайнее левое положение и включить питание двигателя.

Плавно вращая ручку реостата, установить заданную частоту вращения рабочего колеса насоса.

Отметить показания приборов на стенде. Для определения вакуума в линии всасывания следует открыть кран K_1 . (Кран K_1 может быть открытым только при работающем насосе!)

4. Приоткрыть вентиль B_1 ; подрегулировать реостатом частоту вращения рабочего колеса насоса. При стабильной подаче произвести измерение расхода и зафиксировать показания всех приборов.

Для измерения расхода следует с помощью секундомера определить время, в течение которого в ёмкости будет накоплен определённый объём воды.

Величины рекомендуемых объёмов при различных подачах указаны в таблице, приведённой ниже.

Для того, чтобы равномернее охватить весь диапазон изменяемой подачи насоса, рекомендуются следующие степени открытия вентиля B_1 на линии нагнетания:

- 1) вентиль закрыт полностью;
- 2) вентиль приоткрыт на $\frac{1}{16}$ оборота маховика штока;
- 3) вентиль приоткрыт на $\frac{1}{8}$ оборота маховика штока;
- 4) вентиль приоткрыт на $\frac{1}{2}$ оборота маховика штока;
- 5) вентиль приоткрыт на $\frac{7}{8}$ оборота маховика штока;
- 6) вентиль открыт полностью.

Если к выполнению очередного измерения ёмкость частично заполнена водой и её вместимость не позволяет выполнить следующее измерение, рекомендуется, не выключая двигатель насоса, а лишь уменьшив частоту вращения ротора и закрыв вентиль B_1 , произвести опорожнение ёмкости, открыв вентиль B_2 , после чего привести систему в рабочее положение.

5. Завершив экспериментальную часть лабораторной работы, закрыть кран K_1 , выключить привод насоса и опорожнить ёмкость E .

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать подачу насоса в каждом опыте.

Подача насоса рассчитывается по объёму перекаченной воды (V) за измеренный промежуток времени (t):

$$\dot{V} = \frac{V}{t}. \quad (1.4.5)$$

2. Рассчитать напор насоса в каждом опыте по формуле (1.4.2).

При этом учесть, что на лабораторном стенде расстояние по вертикали от точки присоединения вакуумметра к трубопроводу до центра манометра $h_0 = 0,77$ м.

Поскольку шкалы обоих приборов измерения давления отградуированы⁶ в «кгс/см²» (или «ат»), то, при расчёте напора, полезно иметь в виду, что:

$$1 \text{ кгс/см}^2 \cong 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$g \cong 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3.$$

3. Рассчитать полезную мощность по формуле (1.4.3).

4. Рассчитать потребляемую электродвигателем мощность по показаниям вольтметра и амперметра в сети электродвигателя:

$$N_{\text{дв}} = UI, \quad (1.4.6)$$

где U – напряжение; I – сила тока.

5. Рассчитать коэффициент полезного действия (кпд) насосной установки («насос–передача–электродвигатель»), который может быть определён по формуле:

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{N_{\text{пол}}}{N_{\text{дв}}}. \quad (1.4.7)$$

6. Зная кпд насосной установки, а также кпд электродвигателя (здесь $\eta_{\text{дв}} = 0,815$) и кпд передачи механической энергии от двига-

⁶ На момент написания данного руководства манометр на лабораторном стенде имеет шкалу 0...250 условных делений; отметка 250 делений шкалы соответствует давлению 6 кгс/см².

теля к насосу ($\eta_{пер} = 0,96$), вычислить коэффициент полезного действия насоса

$$\eta_n = \frac{\eta_{уст}}{\eta_{дв} \eta_{пер}} \quad (1.4.8)$$

и мощность на валу рабочего колеса насоса

$$N_n = \frac{N_{пол}}{\eta_n} = N_{дв} \eta_{дв} \eta_{пер} \cdot \quad (1.4.9)$$

Экспериментальные и рассчитанные параметры занести в сводную таблицу:

Опыт проведен при $n = \underline{\hspace{2cm}}$ мин⁻¹

№ п/п	V , дм ³	t , с	\dot{V} , дм ³ /с	$v_{вс}$, м/с	$v_{н}$, м/с	s	$p_{ман}$, кгс/см ²	$p_{вак}$, кгс/см ²	H , м
1	—	—	0	0	0				
2	50								
3	50								
4	100								
5	150								
6	200								

№ п/п	$N_{пол}$, Вт	U , В	I , А	$N_{дв}$, Вт	$\eta_{уст}$	η_n	N_n , Вт
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Примечание: s – число делений шкалы манометра.

С целью оценки выполнимости правил пропорциональности следует сопоставить параметры, полученные в различных опытах, отличающихся частотой вращения рабочего колеса насоса, при максимальных подачах насоса.

Параметр	I опыт	II опыт	Отношение параметров
n , мин ⁻¹			
V^{max} , дм ³ /с			
H , м			
$N_{дв}$, Вт			

Проанализировать полученные данные и сделать выводы по работе.

1.5. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ФИЛЬТРОВАНИИ СУСПЕНЗИИ

Содержание работы

Скорость фильтрации, то есть скорость движения жидкости через пористый материал, зависит от движущей силы (разности давлений, созданной в системе) и от гидравлического сопротивления пористого материала.

При фильтрации, то есть при разделении суспензии с образованием слоя осадка (одного пористого материала) на фильтровальной перегородке (другом пористом материале), скорость фильтрации (v_ϕ) может быть выражена уравнением Рута-Кармана:

$$v_\phi = \frac{dV_\phi}{S dt} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{oc} + R_{\phi.п.})} = \frac{\Delta p}{\mu(r_{oc}h_{oc} + R_{\phi.п.})}, \quad (1.6.1)$$

где V_ϕ – объём фильтрата; S – площадь поверхности фильтрации; t – время фильтрования; Δp – разность давлений; μ – вязкость фильтрата; R_{oc} – сопротивление слоя осадка; r_{oc} – удельное сопротивление слоя осадка; h_{oc} – высота слоя осадка; $R_{\phi.п.}$ – сопротивление фильтровальной перегородки.

Если процесс фильтрования проводится при постоянной разности давлений ($\Delta p = \text{const}$), и удельное сопротивление слоя осадка и сопротивление фильтровальной перегородки также остаются постоянными, то соотношение между временем проведения процесса и объёмом полученного фильтрата определяется уравнением:

$$t = \frac{\mu r_{oc} \kappa_{oc}}{2 S^2 \Delta p} V_\phi^2 + \frac{\mu R_{\phi.п.}}{S \Delta p} V_\phi, \quad (1.5.2)$$

где $\kappa_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_\phi}$ – отношение объёма осадка к объёму фильтрата.

Этому квадратному (относительно V_ϕ) уравнению можно придать линейный вид (линейная форма уравнения рекомендуется для наибольшей наглядности результатов эксперимента):

$$\frac{t}{V_\phi} = \frac{\mu R_{\phi.п.}}{S \Delta p} + \frac{\mu r_{oc} \kappa_{oc}}{2 S^2 \Delta p} V_\phi, \quad (1.5.3)$$

что идентично математической зависимости вида

$$y = a_0 + a_1 x, \quad (1.5.4)$$

где $y = \frac{t}{V_\phi}$; $x = V_\phi$; $a_0 = \frac{\mu R_{\phi.п.}}{S \Delta p}$; $a_1 = \frac{\mu r_{oc} \kappa_{oc}}{2 S^2 \Delta p}$.

Располагая значениями коэффициентов уравнения (1.5.4), можно определить сопротивления соответствующих пористых материалов.

Цель работы: экспериментальное определение удельного сопротивления слоя осадка и сопротивления фильтровальной перегородки при разделении суспензии «карбонат кальция — вода».

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.5.

Основным элементом установки является фильтровальная ячейка Φ , идентичная фильтровальной воронке Бюхнера. В этой ячейке фильтровальной перегородкой является хлопчатобумажная ткань.

Исходная суспензия находится в ёмкости E , куда в процессе фильтрования погружается фильтровальная ячейка Φ . Для обеспечения равномерного распределения твёрдой фазы по объёму ёмкости, последняя оборудована лопастной мешалкой M .

Процесс фильтрования проводится при разрежении за фильтровальной перегородкой. Вакуум в системе создается с помощью водоструйного насоса H и измеряется вакуумметром (поз. 1). Расход воды, подаваемой из водопровода в указанный насос, регулируется вентилем B , а давление воды перед насосом измеряется манометром (поз. 2).

Получаемый при разделении суспензии фильтрат собирается в сборнике C , объём которого отградуирован в «см³».

Между сборником фильтрата и водоструйным насосом установлена ловушка L .

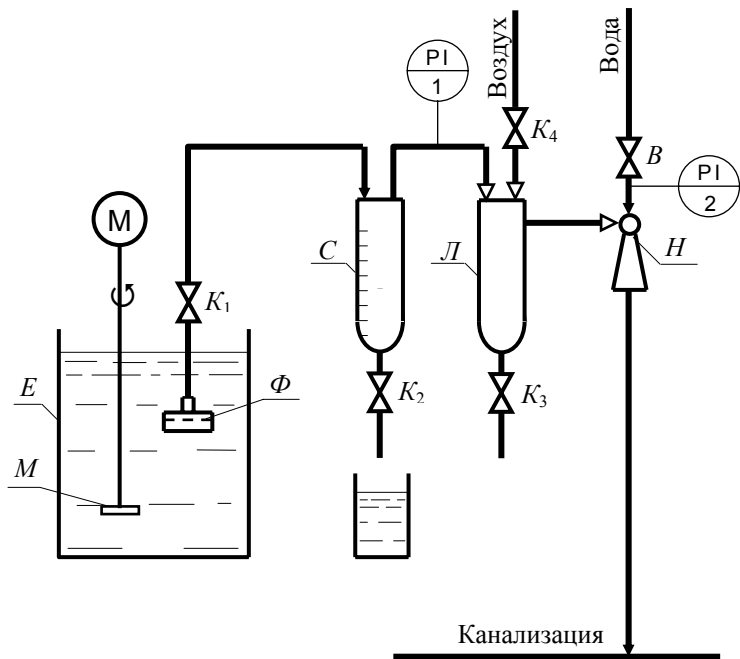


Рис. 1.5. Схема лабораторной установки для определения сопротивлений пористых материалов при фильтрации

Рекомендации по выполнению работы

Перед началом фильтрования освободить (если это необходимо) ячейку от осадка, полученного в предыдущем опыте и промыть фильтровальную ткань; освободить сборник *C* от фильтрата.

1. Замерить штангенциркулем диаметр ячейки – d_{ϕ} .
2. Закрыть все краны, кроме крана K_4 .
3. Включить привод мешалки.
4. Открыть вентиль B подачи воды в струйный насос, поддерживая избыточное давление воды на входе в него не более 2 кгс/см^2 .
5. Закрыть кран K_4 и создать в системе заданное разрежение. Если разрежение превысит установленное значение, то можно несколько приоткрыть этот кран.

6. Погрузить ячейку в суспензию и удерживать её в строго вертикальном положении в течение всего опыта.

Началом опыта по фильтрованию суспензии ($t = 0$) считается момент создания вакуума в ячейке за фильтровальной перегородкой, то есть момент открытия крана K_1 .

7. В ходе эксперимента последовательно отмечать время t , за которое в сборнике фильтрата накопится объём жидкости $V_C = 0, 25, 50, \dots, 125 \text{ см}^3$. Объём $V_C = 0$ фиксируется в момент попадания в сборник первой капли фильтрата; за время от начала опыта до этого момента происходит заполнение фильтратом линии, соединяющей ячейку со сборником

По достижении $V_C = 150 \text{ см}^3$ зафиксировать соответствующее время фильтрования; немедленно извлечь ячейку из суспензии и перевернуть её поверхностью фильтрования вверх; добиться полного стока фильтрата из коммуникаций в сборник. Отметить общий (суммарный) объём фильтрата V_{ϕ} в сборнике после выполнения этой процедуры.

8. Открыть кран K_4 сообщения системы с атмосферой и только после этого выключить водоструйный насос.

9. Измерить штангенциркулем (не менее чем в трёх точках) толщину слоя осадка (h_{oc}) на фильтре.

10. Снять шпателем осадок с ячейки и вернуть его в ёмкость E ; слить фильтрат из сборника C и вернуть его в ёмкость E .

Результаты измерений внести в сводную таблицу:

Опыт проведен при $\Delta p = \underline{\hspace{2cm}}$ мм рт. ст. = $\underline{\hspace{2cm}}$ Па

№ п/п	Объём жидкости в сборнике $V_C, \text{ см}^3$	Время фильтрования $t, \text{ с}$	$\Delta V, \text{ см}^3$	Общий объём фильтрата $V_{\phi} \cdot 10^6, \text{ м}^3$	$t/V_{\phi} \cdot 10^{-6}, \text{ с/м}^3$
1	0				
2	25				
3	50				
4	75				
...	...				
7	150				

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать объём осадка, полученного в опыте

$$V_{\text{ос}} = h_{\text{ос}} \frac{\pi d_{\text{ф}}^2}{4}. \quad (1.5.5)$$

2. Определить отношение объёма осадка, получающегося на единицу объёма фильтрата, собранного в течение всего процесса фильтрования – $\kappa_{\text{ос}}$.

3. По данным последнего измерения вычислить объём жидкости (ΔV), находившейся в течение всего опыта в коммуникациях ячейки со сборником; рассчитать для каждого зафиксированного момента времени t общий объём фильтрата $V_{\text{ф}}$ как сумму объёма его в сборнике ($V_{\text{с}}$) и объёма фильтрата в коммуникациях (ΔV); рассчитать отношение $t/V_{\text{ф}}$.

4. Найти числовые значения коэффициентов a_0 и a_1 уравнения (1.5.4), обработав экспериментальные данные методами математической статистики.

5. Рассчитать значения удельного сопротивления слоя осадка и сопротивления фильтровальной перегородки.

Полученные значения $r_{\text{ос}}$ и $R_{\text{ф.п.}}$ сравнить с их средними величинами, приводимыми в учебной и справочной литературе.

1.6. ГИДРОДИНАМИКА ПСЕВДООЖИЖЕННОГО ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ

Содержание работы

Поток газа (или жидкости), проходящий через слой зернистого материала, испытывает со стороны слоя сопротивление и частично теряет энергию (давление). Уменьшение давления (Δp) при фильтрации газа через неподвижный слой может быть выражено уравнением Эргуна:

$$\Delta p = 150 \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\psi^2 \varepsilon_0^3} \cdot \frac{h_0}{d_0^2} \mu_G v_0 + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_0}{\psi \varepsilon_0^3} \cdot \frac{h_0}{d_0} \rho_G v_0^2, \quad (1.6.1)$$

где v_0 – фиктивная скорость потока; ρ_G – плотность газа; μ_G – динамическая вязкость газа; h_0 – высота слоя в неподвижном состоянии; d_0 – размер частицы (диаметр эквивалентного шара); ε_0 – порозность слоя в неподвижном состоянии; ψ – фактор формы частицы.

Сила сопротивления слоя (F_c), действующая на поток, равна:

$$F_c = \Delta p S, \quad (1.6.2)$$

где S – площадь поперечного сечения аппарата.

В соответствии с III законом Ньютона классической механики, равновеликая сила действует со стороны потока на частицы слоя. Очевидно, эта сила увеличивается с увеличением скорости газа.

При достижении определённой скорости *восходящего* потока сила сопротивления уравнивает вес частиц, находящихся в данной сплошной (газовой или жидкой) среде. Зернистый слой переходит из неподвижного во взвешенное или, что то же самое, псевдооживлённое состояние.

Гидравлическое сопротивление псевдооживлённого слоя не зависит от величины фиктивной скорости, а определяется лишь весом частиц в данной среде, приходящимся на единицу площади поперечного сечения аппарата, то есть

$$\Delta p = \frac{G}{S} = (\rho_s - \rho_G) g h (1 - \varepsilon), \quad (1.6.3)$$

где G – вес частиц в среде; ρ_s – плотность [кажущаяся] твёрдых частиц; h – высота псевдооживленного слоя; ε – порозность псевдооживленного слоя.

Переход состояния слоя от неподвижного к псевдооживленному, происходящий при скорости начала псевдооживления ($v_{0,пс}$), отображается характерным изломом кривой зависимости сопротивления слоя от фиктивной скорости потока сплошной фазы или так называемой «кривой псевдооживления».

Цель работы: визуальное ознакомление с псевдооживленным состоянием слоя зернистого материала; экспериментальное определение скорости начала псевдооживления и гидравлического сопротивления «кипящего» слоя; сопоставление экспериментальных и расчётных величин.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.6.

Основными элементами лабораторной установки являются две стеклянные колонки K_1 и K_2 внутренним диаметром 105 мм каждая. В средней части каждой колонки на опорной решётке помещён зернистый материал. Характеристики зёрен (частиц) и слоёв в целом приводятся ниже:

Характеристика	Колонка 1	Колонка 2
Материал частиц	полиэтилен	уголь
Плотность частиц, кг/м ³	832	1430
Размер частиц (диаметр эквивалентного шара), мм	3,9	1,41
Фактор формы частицы	≅0,80	≅0,82
Насыпная плотность, кг/м ³	490	638
Высота неподвижного слоя, мм	65	55

В колонках до слоя и после него установлены датчики отбора давления. Разность давлений в указанных точках измеряется U-образными дифференциальными манометрами (поз. 1, 2), заполненными водой.

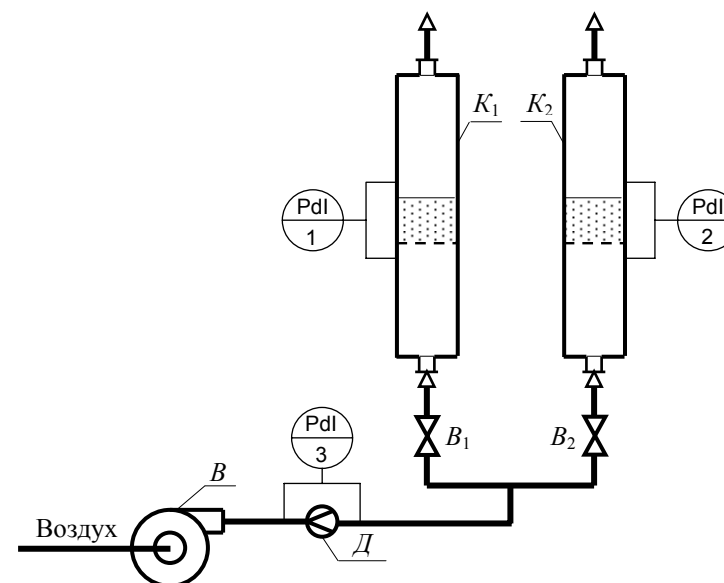


Рис. 1.6. Схема лабораторной установки для исследования гидродинамики псевдооживленного зернистого слоя

Через нижние штуцеры в колонку K_1 или K_2 подаётся воздух, нагнетаемый вентилятором В. Расход воздуха регулируется вентилем B_1 или B_2 . На линии подачи воздуха установлена мерная диафрагма Д, соединённая с U-образным дифференциальным манометром (поз. 3), заполненным водой.

Расход воздуха определяется по формулам:

□ при $\Delta h_m < 40$ мм вод. ст.

$$\dot{V} = 0,668 \cdot \Delta h_m^{0,573}, \quad (1.6.4)$$

□ при $\Delta h_m \geq 40$ мм вод. ст.

$$\dot{V} = 0,786 \cdot \Delta h_m^{0,529}, \quad (1.6.5)$$

где \dot{V} – объёмный расход воздуха, дм³/с;

Δh_m – разность уровней воды в коленах U-образного дифференциального манометра, мм.

Воздух, прошедший через зернистый слой, выбрасывается в атмосферу.

Рекомендации по выполнению работы

Перед началом работы закрыть вентили B_1 и B_2 .

1. Приоткрыть вентиль B_1 (или B_2); включить вентилятор; зафиксировать показания дифференциального манометра, соединённого с диафрагмой (Δh_m), а также манометра, измеряющего гидравлическое сопротивление зернистого слоя ($\Delta p_{сл}$).

2. Увеличить степень открытости вентиля и зафиксировать новые показания дифференциальных манометров.

Опыты продолжить таким образом, чтобы получить не менее 5 точек (для построения кривой псевдооживления) в области неподвижного состояния зернистого слоя и не менее 3 – в области псевдооживленного. Последнее измерение проводить при максимальном расходе воздуха, то есть при полностью открытом вентиле подачи воздуха в колонку.

3. По окончании экспериментов выключить вентилятор и закрыть вентиль подачи воздуха в колонку.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать фиктивные скорости газового потока в колонке для каждой экспериментальной точки.

Результаты измерений и расчётов занести в таблицу:

№ п/п	Δh_m , мм вод. ст.	\dot{V} , дм ³ /с	v_o , м/с	$\Delta p_{сл}$, мм вод. ст.
1.				
2.				
...				
n				

2. Построить график зависимости сопротивления слоя от фиктивной скорости газового потока и определить по этому графику экспериментальное значение скорости начала псевдооживления ($v_{o, пс (экс)}$) зернистого слоя.

3. Сопоставить полученное экспериментальное значение скорости начала псевдооживления со значением, рассчитанным по формуле:

$$v_{o, пс (расч)} = \frac{Re_{o, пс} \mu_G}{d_o \rho_G}, \quad (1.6.6)$$

где число Рейнольдса, соответствующее скорости начала псевдооживления, рассчитывается по формуле Тодеса:

$$Re_{o, пс} = \frac{Ar}{150 \frac{1 - \varepsilon_o}{\psi^2 \varepsilon_o^3} + \sqrt{\frac{1,75}{\psi \varepsilon_o^3} Ar}}. \quad (1.6.7)$$

Здесь критерий Архимеда определяется формулой:

$$Ar = \frac{d_o^3 g \rho_G^2}{\mu_G^2} \cdot \frac{\rho_s - \rho_G}{\rho_G}. \quad (1.6.8)$$

3. Сопоставить экспериментально найденное значение гидравлического сопротивления псевдооживленного зернистого слоя со значением, рассчитанным по формуле (1.6.3).

Проанализировать полученные данные и сделать выводы по работе.

1.7. СКОРОСТЬ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ

Содержание работы

Твёрдая частица, помещённая в вязкую среду, под действием внешнего силового (например, гравитационного) поля движется ускоренно до тех пор, пока возрастающая сила гидродинамического сопротивления не сравняется с весом частицы в среде. Однако стадия ускоренного движения непродолжительна, в связи с чем осаждение частиц рассматривается как процесс, протекающий с постоянной скоростью.

Если частица имеет сферическую форму, то скорость её гравитационного осаждения определяется формулой:

$$v_o = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_o g \rho_s - \rho_L}{\zeta \rho_L}}, \quad (1.7.1)$$

где v_o – скорость осаждения; d_o – диаметр сферической частицы; ρ_s – плотность твёрдой частицы; ρ_L – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; ζ – коэффициент сопротивления, зависящий от скорости осаждения.

Таким образом, если известен коэффициент сопротивления, то может быть вычислена скорость осаждения частицы в данной жидкости, а если известна скорость, то может быть рассчитан коэффициент сопротивления.

Скорость осаждения легко может быть найдена измерением времени, в течение которого частица проходит известное расстояние в среде.

Физические свойства жидкости могут быть определены инструментально соответствующими приборами, а именно: плотность – ареометром, вязкость – вискозиметром подходящего типа.

Цель работы: экспериментальное определение скорости гравитационного осаждения твёрдых частиц в жидкости; сравнение экспериментальных и теоретических величин скоростей осаждения; определение зависимости коэффициента сопротивления от скорости осаждения.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для определения скорости гравитационного осаждения частиц изображена на рис. 1.7.

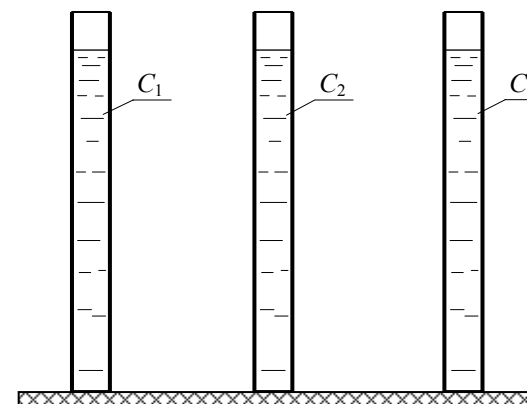


Рис. 1.7. Лабораторная установка для определения скорости гравитационного осаждения частиц

Установка состоит из трёх прозрачных цилиндров $C_1...C_3$, заполненных разными жидкостями: водой – C_1 , глицерином – C_2 и маслом трансформаторным – C_3 . Вверху и внизу каждого цилиндра нанесены метки, расположенные на расстоянии $l = 1$ м друг от друга. Уровень жидкости в каждом цилиндре на 10...15 см выше верхней метки; это позволяет исключить влияние начального ускоренного движения частицы на результаты эксперимента.

В качестве осаждаемых тел используются шарики, выполненные из алюминия, поливинилхлорида (ПВХ), свинца и стали. Основные характеристики осаждаемых частиц приведены ниже:

Материал	ρ_s , кг/м ³	d_o , мм	Материал	ρ_s , кг/м ³	d_o , мм
ПВХ	1245	≈3,2	Сталь	7812	2,50
Алюминий	2699	3,175	Сталь	7812	3,175
Алюминий	2699	3,95	Сталь	7812	4,00
			Свинец	10470	≈3,2

Рекомендации по выполнению работы

1. Определить физические свойства жидкостей – масла трансформаторного и глицерина.

Плотность жидкости (ρ_L) определяется ареометром (см. с. 48), погружаемым в испытуемую жидкость, залитую в мерный цилиндр.

Вязкость жидкости (μ_L) определяется вискозиметром по методу Хёпплера с падающим шаром (см. с. 49).

При выполнении измерений вязкости рекомендуется разместить за вискозиметром лист белой бумаги и наблюдать за падающим шаром на этом фоне.

2. Экспериментально определить скорость осаждения заданной частицы в заданной жидкости.

Перед выполнением эксперимента по определению скорости осаждения измеряется с помощью штангенциркуля или микрометра (см. с. 53, 56) размер шарика (из ПВХ или свинца) не менее чем в 3-х направлениях и вычисляется его средний диаметр d_o .

Шарики известного или замеренного диаметра помещаются над поверхностью жидкости в цилиндре и аккуратно отпускаются. С помощью секундомера фиксируется время ($t_{\text{эсп}}$) прохождения частицей (шариком) расстояния между метками.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать теоретическую скорость осаждения.

Теоретическое значение скорости осаждения частицы ($v_{o,т}$) рассчитывается в следующем порядке:

а) определяется значение критерия Архимеда данной двухфазной системы

$$Ar = \frac{d_o^3 g \rho_L^2}{\mu_L^2} \cdot \frac{(\rho_S - \rho_L)}{\rho_L}; \tag{1.7.2}$$

б) определяется теоретическое значение критерия Рейнольдса ($Re_{o,т}$) в процессе осаждения:

▫ при $Ar \leq 36$

$$Re_{o,т} = \frac{Ar}{18}; \tag{1.7.3}$$

▫ при $36 < Ar < 90000$

$$Re_{o,т} = 0,153 Ar^{0,714}; \tag{1.7.4}$$

▫ при $Ar \geq 90000$

$$Re_{o,т} = \sqrt{\frac{Ar}{0,36}}; \tag{1.7.5}$$

в) определяется теоретическая скорость осаждения частицы:

$$v_{o,т} = \frac{Re_{o,т} \mu_L}{d_o \rho_L}. \tag{1.7.6}$$

2. Рассчитать экспериментальную скорость осаждения.

Экспериментальное значение скорости осаждения частицы рассчитывается по формуле:

$$v_{o,э} = l / t_{\text{эсп}}, \tag{1.7.7}$$

где $l = 1,0$ м — расстояние между метками на цилиндре.

Найденное значение скорости осаждения используется для вычисления экспериментальной величины критерия Рейнольдса

$$Re_{o,э} = \frac{v_{o,э} d_o \rho_L}{\mu_L} \tag{1.7.8}$$

и коэффициента сопротивления

$$\zeta = \frac{4}{3} \frac{d_o g}{v_o^2} \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L}. \tag{1.7.9}$$

Полученные результаты заносятся в сводную таблицу:

Жид- кость	ρ_L , кг/м ³	μ_L , Па·с	Тв.	ρ_S , кг/м ³	d_o , мм	Ar	$Re_{o,т}$	$v_{o,т}$ м/с	$t_{т}$, с	$t_{э}$, с	$v_{o,э}$ м/с	$Re_{o,э}$	ζ

Все *экспериментальные* данные обобщаются и аппроксимируются зависимостью вида:

$$\zeta = C \operatorname{Re}_{0,3}^n. \quad (1.7.11)$$

На основании данных об экспериментальной и теоретической скоростях осаждения частицы, а также по виду зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса (числовым величинам коэффициентов C и n уравнения (1.7.11)) делается соответствующее заключение.

1.8. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА В АППАРАТЕ С МЕШАЛКОЙ

Содержание работы

Структура потока или, другими словами, – фактическое распределение параметра субстанции (температуры, концентрации и т. д.) в объёме аппарата, определяется фактическим полем скоростей и может быть описана какой-либо типовой математической моделью, например, *ячеечной* моделью.

Ячеечная модель рассматривает реальный объём аппарата как совокупность последовательно соединённых виртуальных ячеек равного объёма. В пределах каждой ячейки жидкость идеально перемешана; между ячейками перемешивание отсутствует.

Параметром этой модели является число ячеек n . Очевидно, что при $n = 1$ ячеечная модель тождественна модели идеального смешения, а при $n = \infty$ — модели идеального вытеснения.

О структуре потока можно судить по распределению частиц по времени пребывания в аппарате. При этом экспериментальный метод исследования структуры потока в аппарате обычно реализуется так: в аппарат подают трассёр, например, с постоянным расходом при постоянном значении регистрируемого параметра (так называемый «ступенчатый метод» ввода трассёра), и одновременно с этим измеряют его (параметра) величину *на выходе* из аппарата как функцию времени. Получаемая зависимость называется функцией (кривой) отклика системы на типовое возмущение.

Статистическая обработка кривой отклика позволяет определить параметр модели структуры потока.

Если для построения кривой отклика используется безразмерный параметр F , значение которого в эксперименте изменяется от 0 до 1, то среднее время пребывания частиц в аппарате при *ступенчатом* вводе трассёра определяется выражением:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} (1 - F) \cdot dt = \int_0^{\infty} I \cdot dt, \quad (1.8.1)$$

где $I = (1 - F)$ — безразмерный параметр в момент времени t , а дисперсия времени пребывания (в единицах времени)

$$\begin{aligned} \sigma_t^2 &= 2 \cdot \int_0^{\infty} (1-F) \cdot t \cdot dt - \left[\int_0^{\infty} (1-F) \cdot dt \right]^2 = \\ &= 2 \cdot \int_0^{\infty} I \cdot t \cdot dt - \left[\int_0^{\infty} I \cdot dt \right]^2. \end{aligned} \quad (1.8.2)$$

Безразмерная дисперсия времени пребывания частиц жидкости в аппарате определяется соотношением:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2}. \quad (1.8.3)$$

По величине безразмерной дисперсии времени пребывания частиц в аппарате можно судить о числе ячеек полного перемешивания, так как связь между ними определяется простым соотношением:

$$n = \frac{1}{\sigma^2}. \quad (1.8.4)$$

Цель работы: получение кривой отклика на ступенчатый ввод трассёра в аппарат с мешалкой; определение среднего времени пребывания частиц в аппарате; расчёт числа ячеек идеального смешения в обследуемом аппарате.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.8.

Основным элементом лабораторной установки является стеклянный реакционный сосуд — ёмкость E грушевидной формы вместимостью 30 дм³.

Сосуд может быть заполнен горячей водой, подаваемой из системы горячего водоснабжения через вентиль B_3 ; в сосуд может быть подана холодная вода из водопровода, расход которой регулируется вентилем B_2 и измеряется ротаметром (поз.6).

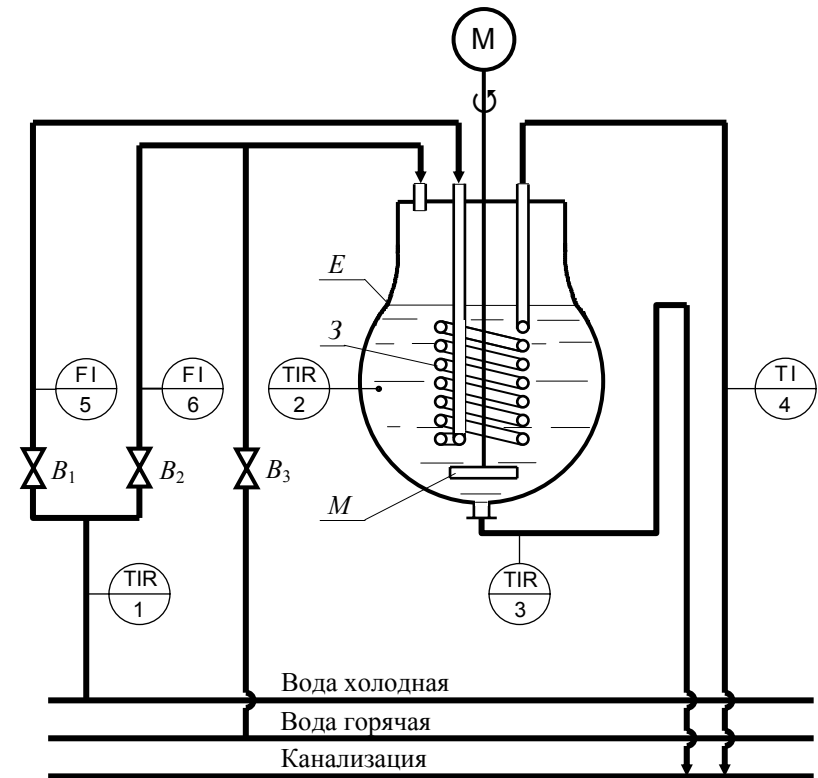


Рис. 1.8. Схема лабораторной установки для изучения гидродинамической структуры потока

Расход воды через указанный ротаметр определяется по формуле:

$$\dot{V} = 5,90 \cdot 10^{-3} + 3,23 \cdot 10^{-4} s + 7,7 \cdot 10^{-7} s^2, \quad (1.8.5)$$

где \dot{V} — объёмный расход воды, дм³/с;

s — число делений шкалы, обозначенное положением поплавка ротаметра.

Благодаря специально организованному стоку, объём воды в ёмкости постоянен и равен $V_E = 20,16$ дм³. При этом средний диаметр заполненной части аппарата составляет $D_{\text{ап}} = 0,299$ м.

Аппарат снабжён змеевиком 3 и стеклянной лопастной мешалкой M диаметром $d_m = 136$ мм, вращающейся с частотой $n = 2$ с⁻¹.

Лабораторная установка оборудована трёхпозиционным электронным мостом КСМ-4И для измерения и регистрации температуры с помощью термометров сопротивления (поз. 1, 2, 3), установленных соответственно на линии подачи холодной воды, в объёме реакционного сосуда и на линии стока воды из ёмкости в канализацию.

Рекомендации по выполнению работы

1. Произвести заполнение ёмкости горячей водой.

Заполнение сосуда горячей водой осуществляется при открытом вентиле B_3 путём замещения ею (горячей водой) холодной воды, находящейся в ёмкости.

Для обеспечения равномерного распределения по всему объёму поступающей в ёмкость горячей воды рекомендуется включить привод мешалки M .

При выполнении процедуры заполнения сосуда горячей водой рекомендуется следить за тем, чтобы скорость притока воды не превышала скорость стока.

Желательно добиться разогрева воды в сосуде до максимально возможного значения температуры (что зависит от температуры воды в системе горячего водоснабжения), о величине которой судят по показаниям контрольно-самопишущего прибора.

По достижении максимальной температуры жидкости в сосуде перекрыть вентиль B_3 . Если при этом уровень жидкости в ёмкости превышает исходное значение, определяемое меткой на поверхности сосуда, дожидаться стока избытка воды в канализацию.

2. Открыть вентиль B_2 подачи трассёра (холодной воды) в ёмкость, установив заданный расход.

3. Периодически через равные интервалы времени $\Delta t = 3$ мин производить измерение и фиксацию температуры воды на выходе из ёмкости. Эксперимент рекомендуется выполнять в течение ≈ 30 минут.

4. Завершив накопление информации для построения кривой отклика, закрыть вентиль B_2 , выключить привод мешалки и контрольно-самопишущий прибор регистрации температуры.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать для каждого момента времени (t) безразмерный параметр F кривой отклика на ступенчатый ввод трассёра:

$$F = \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T_k}, \quad (1.8.6)$$

а также безразмерный параметр I :

$$I = 1 - F, \quad (1.8.7)$$

где T_0 , T_i и T_k – температуры воды на выходе из ёмкости соответственно в начальный, промежуточный и конечный моменты времени проведения эксперимента.

2. Построить кривую отклика в координатах « $F-t$ ».

3. Рассчитать по (1.8.1)...(1.8.4): экспериментальное значение среднего времени пребывания частиц жидкости в аппарате; дисперсию времени пребывания в единицах времени и её безразмерную величину; число ячеек полного перемешивания.

Численное интегрирование экспериментальных данных может быть выполнено «методом трапеций», при этом

$$\int_0^{\infty} I \cdot dt \approx \left[\frac{I_0}{2} + \sum_{i=1}^{i=k-1} I_i + \frac{I_k}{2} \right] \cdot \Delta t, \quad (1.8.8)$$

$$\int_0^{\infty} I \cdot t \cdot dt \approx \left[\frac{(I \cdot t)_0}{2} + \sum_{i=1}^{i=k-1} (I \cdot t)_i + \frac{(I \cdot t)_k}{2} \right] \cdot \Delta t, \quad (1.8.9)$$

где $i = 0 \dots k$.

4. Рассчитать теоретическое среднее время пребывания частиц жидкости в аппарате:

$$\bar{t}_{\text{теор}} = \frac{V_{\Lambda}}{V} \quad (1.8.10)$$

и сравнить его с экспериментальным значением, полученным по формуле (1.8.1).

Следует иметь в виду, что при подаче трассёра с расходом $0,02 \dots 0,03 \text{ дм}^3/\text{с}$ в сосуде создается подпор воды (необходимый для преодоления гидравлического сопротивления отводящей линии) дополнительным объёмом $V_{\text{доп}} \cong 0,6 \text{ дм}^3$.

Таким образом, при проведении опыта объём жидкости в аппарате (V_A) составляет: $V_A = V_E + V_{\text{доп}}$.

Экспериментальные и рассчитанные данные занести в таблицу:

i	t , мин	T_i , °C	F	I	$I \cdot t$, мин
0	0		0,0000	1,0000	
1	3				
2	6				
...	...				
$k-1$					
k			1,0000	0,0000	

Проанализировать полученные данные и сделать выводы по работе.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Инструменты и приборы, используемые при выполнении лабораторного практикума

Ареометр – прибор для измерения плотности жидкости.

Название прибора происходит от гр. $\alpha\rho\alpha\iota\sigma$ – неплотный и $\mu\epsilon\tau\rho\epsilon\omega$ – измеряю.

Устройство ареометра показано на рис. П.1.

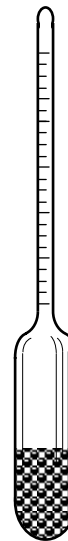


Рис. П.1. Ареометр

Ареометр представляет собой стеклянную цилиндрическую ампулу, снабжённую длинным отрезком – стержнем, на который нанесена шкала значений плотности. Нижняя часть ампулы заполнена балластом, которым служит металлическая дробь, залитая слоем смолы или сургуча. Балласт заставляет ареометр плавать в вертикальном положении.

Для определения плотности испытуемой жидкости её наливают в чистый стеклянный цилиндр. Ареометр осторожно погружают в жидкость, держа его за верхний конец, не задевая стенок цилиндра, и отпускают только тогда, когда убедятся, что он плавает.

Показание ареометра отсчитывают по линии пересечения стержня прибора нижним краем мениска жидкости.

Следует учитывать, что показание прибора будет неправильным, если жидкость смочит стержень ареометра намного выше штриха, соответствующего плотности испытуемой жидкости.

Вакуумметр, вакуумный манометр – прибор для измерения давления разрежённых газов, давления жидкостей ниже атмосферного.

Название прибора происходит от лат. $vacuum$ – пустота и гр. $\mu\epsilon\tau\rho\epsilon\omega$ – измеряю.

Устройство и принцип действия вакуумметра аналогичны устройству и действию манометра (см. ниже).

Вискозиметр – прибор для измерения вязкости жидкости.

Название прибора происходит от лат. *viscosus* – вязкий и гр. *μετροω* – измеряю.

В лабораторном практикуме используется вискозиметр по методу Хёпплера (Höppler). Согласно этому методу измеряется время падения калиброванного шара в цилиндрической трубке, наклоненной на 10° по отношению к вертикали и наполненной испытуемой жидкостью.

Устройство вискозиметра показано на рис. П.2.

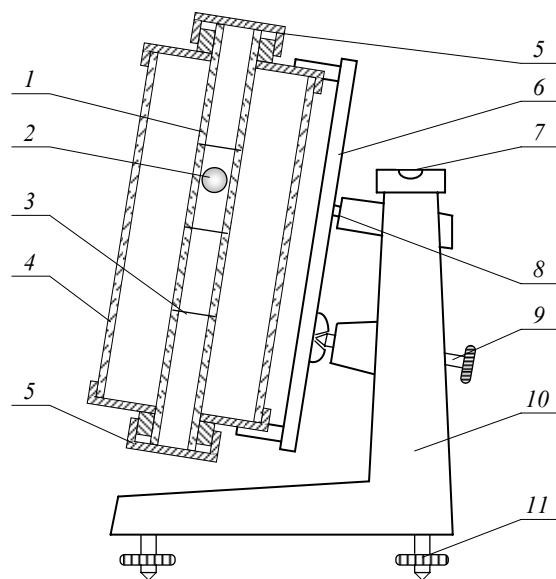


Рис. П.2. Вискозиметр по методу Хёпплера:
1 – трубка; 2 – шар; 3 – кольцевая метка; 4 – колба;
5 – крышка; 6 – пластина; 7 – уровень; 8 – турель;
9 – фиксирующий стержень; 10 – штатив; 11 – установочный винт

Основной деталью прибора является стеклянная трубка 1, в которой находится стальной калиброванный шар 2 и которая заполняется испытуемой жидкостью. С обоих концов трубка закрыта крышками 5.

С целью определения вязкости при различных температурах трубка закреплена в стеклянной колбе 4, выполняющей функцию термостата. С колбой 4 соединена металлическая пластина 6, насаженная на турель⁷ 8.

Для начальной установки или возврата шара 2 в исходное положение следует оттянуть фиксирующий стержень 9 на стойке прибора 10 и повернуть колбу на 180° . При измерении вязкости колба устанавливается в рабочее положение и фиксируется стержнем 9.

Не менее чем в 3-х опытах фиксируется время падения шара от одной кольцевой метки 3 на трубке до другой, расстояние между которыми 100 мм.

Среднее значение времени ($t_{\text{виск}}$) используется для расчета вязкости по формуле:

$$\mu_L = K \cdot (\rho_S - \rho_L) \cdot t_{\text{виск}}, \quad (\text{П.1})$$

где μ_L – вязкость жидкости, Па·с;

K – константа, указанная на вискозиметре, Па·с/[(кг/м³)·с];

ρ_S – плотность шара в вискозиметре, кг/м³;

ρ_L – плотность жидкости в вискозиметре, кг/м³;

$t_{\text{виск}}$ – время падения шара в вискозиметре, с.

Следует учитывать, что полученное значение вязкости будет неправильным, если изначально прибор не будет выставлен строго по уровню 7 с помощью установочных винтов 11.

Дифманометр, дифференциальный манометр – прибор для измерения разности (перепада) давлений.

Название прибора происходит от слов: лат. *differentia* – разность, гр. *μανος* – неплотный и *μετροω* – измеряю.

Для измерения небольших разностей давления применяются жидкостные дифференциальные манометры.

⁷ Турель – приспособление для кругового вращения.

Простейший жидкостный дифференциальный манометр представляет собой стеклянную трубку U-образной формы (см. рис. П.3). Трубка заполняется примерно до половины её объёма (точнее – до нулевой отметки шкалы) так называемой манометрической жидкостью. Манометрическая жидкость должна не смешиваться с рабочей жидкостью и иметь плотность (ρ_m) больше, чем плотность рабочей среды (ρ_L), в которой измеряется давление. В качестве манометрической жидкости используется, как правило, вода (при измерении разности давлений в газовой среде) или ртуть.

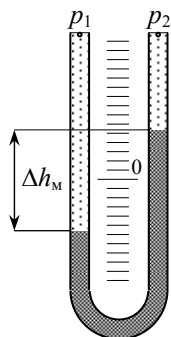


Рис. П.3. U-образный дифманометр

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_m - \rho_L) \cdot g \cdot \Delta h_m. \quad (\text{П.2})$$

Полезно иметь в виду, что понижение уровня манометрической жидкости в одном колене прибора относительно исходного положения равновелико повышению уровня в другом. Следовательно, величина Δh_m может быть определена как удвоенное значение изменения уровня в одном из колен дифманометра.

Большей точностью измерения небольшой разности давлений обладает чашечный дифманометр (см. рис. П.4).

Чашечный дифманометр представляет собой два сообщающихся сосуда – чашку 1 и трубку 2, установленную наклонно, причём диаметр чашки намного больше диаметра трубки.

На манометрическую жидкость, находящуюся в чашке подаётся большее давление, на жидкость в трубке – меньшее. Под действием указанной разности давлений манометрическая жидкость перемещается из чашки в трубку. При этом понижение уровня в чашке

Открытые концы трубки подсоединяются к обследуемому объекту.

В том случае когда в одной точке рабочей среды давление равно p_1 , а в другой точке – p_2 , причём $p_1 \neq p_2$, границы раздела манометрической и рабочей жидкостей в приборе устанавливаются на различной высоте. Разность уровней манометрической жидкости (Δh_m) в двух коленях прибора пропорциональна разности давлений и, в соответствии с уравнением гидростатики, искомая разность давлений равна:

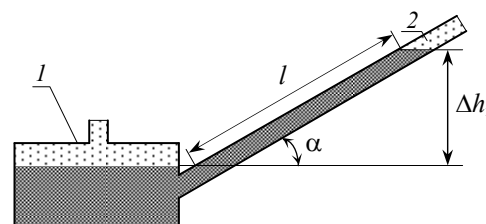


Рис. П.4. Чашечный дифманометр: 1 – чашка; 2 – трубка

пренебрежимо мало, а повышение уровня в трубке на величину Δh_m пропорционально длине $l = \Delta h_m / \sin \alpha$.

Таким образом, с уменьшением угла α наклона трубки повышается точность измерения.

Манометр – прибор для измерения давления жидкостей и газов.

Название прибора происходит от гр. *μανος* – неплотный и *μετροω* – измеряю.

Для измерения давления, значительно превышающего атмосферное, применяется металлический манометр, устройство которого показано на рисунке П.5. (На рисунке манометр показан как бы с прозрачным циферблатом.)

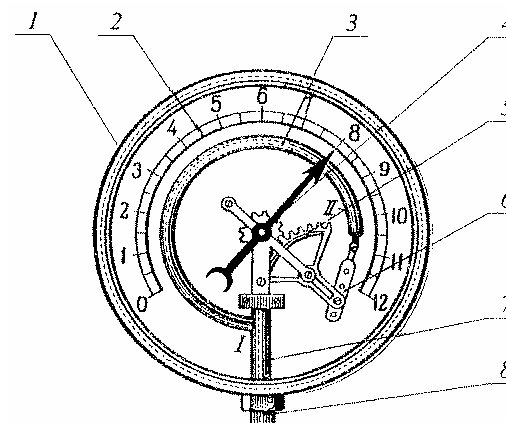


Рис. П.5. Металлический манометр: 1 – корпус; 2 – шкала; 3 – трубка; 4 – стрелка; 5 – зубчатый сектор; 6 – поводок; 7 – стойка; 8 – патрубок

Главной частью такого манометра является находящаяся внутри корпуса 1 полая металлическая трубка 3, изогнутая в виде дуги. Трубка изготовлена из достаточно упругого материала и имеет поперечное сечение овальной формы. Открытым концом I трубка прикреплена к стойке 7 и через патрубок 8 подсоединяется к контролируемой среде. Другой конец II трубки

запаян. Чем больше давление жидкости (или газа), заполняющей трубку 3, тем больше эта трубка распрямляется. Происходит это потому, что площадь выпуклой поверхности трубки больше площади вогнутой, а давление внутри трубки одинаково. Следовательно, сила давления внутри трубки на выпуклую поверхность больше, чем на вогнутую. Это и вызывает разгибание трубки 3.

Через поводок 6 и зубчатый сектор 5 перемещение конца II трубки передаётся сидящей на оси стрелке 4 прибора. Угол поворота стрелки пропорционален величине распрямления трубки.

Положение стрелки, соответствующее атмосферному давлению, отмечается «нулём» на шкале 2 прибора. Манометр показывает, насколько измеряемое давление превышает атмосферное, то есть показывает так называемое «избыточное давление».

Микрометр – инструмент для измерения линейных размеров тел с точностью до сотых долей миллиметра.

Название инструмента происходит от гр. *микрос* – малый и *метрео* – измеряю.

Устройство микрометра показано на рис. П.6.

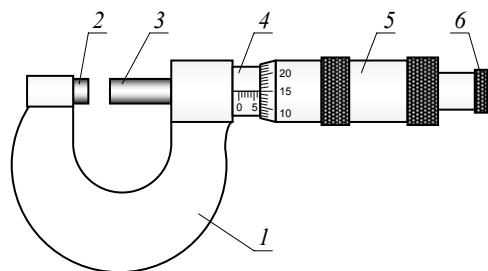


Рис. П.6. Микрометр:
1 – скоба; 2 – пятка; 3 – микрометрический винт; 4 – стебель; 5 – барабан; 6 – трещотка

Основная деталь микрометра – стальная скоба 1. С одной стороны на ней закреплена неподвижная пятка 2, а с другой – стебель 4. Внутри стебля помещён микрометрический винт 3, заканчивающийся с

левой стороны измерительной поверхностью. С правой стороны микрометрический винт соединён с барабаном 5, охватывающим стебель микрометра. При вращении барабана вращается и микрометрический винт, причём при одном обороте барабана измерительная поверхность винта перемещается на 0,5 мм относительно неподвижной пятки микрометра.

На поверхности стебля 4 имеется шкала с миллиметровыми делениями. По левому краю барабана 5 нанесено 50 равноотстоящих делений.

При смыкании измерительной поверхности микрометрического винта с поверхностью неподвижной пятки край барабана устанавливается против нулевой риски на шкале стебля. При вращении барабана на 2 оборота микрометрический винт смещается на 1 миллиметр.

Для определения размера тела его помещают между пяткой 2 и винтом 3 и вращением барабана 5 достигают соприкосновения измерительных поверхностей пятки и винта с телом. Во избежание деформации тела барабан рекомендуется вращать с помощью трещотки 6. По положению кромки барабана определяют целое число миллиметров, считанное со шкалы на стебле; сотые доли миллиметра отсчитывают по шкале на барабане микрометра, определяя, какой из штрихов этой шкалы точно совпадает с продольной риской на стебле. Размер тела получают сложением числа целых и числа сотых долей миллиметра.

Ротаметр – прибор для измерения расхода жидкости.

Название прибора происходит от лат. *rotare* – вращать и гр. *метрео* – измеряю.

На рис. П.7 показано обычное устройство ротаметра.

В верхнем 1 и нижнем 12 корпусах, соединённых друг с другом шпильками 5, с помощью втулок 4 и 9, а также сальниковых уплотнений 3 и 10 укреплен стеклянная коническая трубка 6. Трубка укрепляется расширяющимся концом вверх. Конусность трубки невелика и составляет 0,001...0,01, так что визуально она воспринимается как цилиндрическая. Внутри трубки вертикально перемещается поплавок 8. В прежних конструкциях на боковой поверхности поплавка делали косые канавки, вызывавшие его вращение при движении жидкости (отсюда и название устройства), что способствовало центрированию поплавка относительно оси трубки; в дальнейшем выяснилось, что поплавок занимает соосные с трубкой положения и без вращательного движения. Для ограничения хода поплавка служат верхний 2 и нижний 11 упоры.

Коническая трубка и поплавок образуют проточную часть ротаметра.

Непосредственно на стеклянную трубку нанесена шкала 7, имеющая 100 условных делений. Расход жидкости определяют по калибровочным графикам или расчётным уравнениям соответственно отметке шкалы, обозначенной верхним краем поплавка.

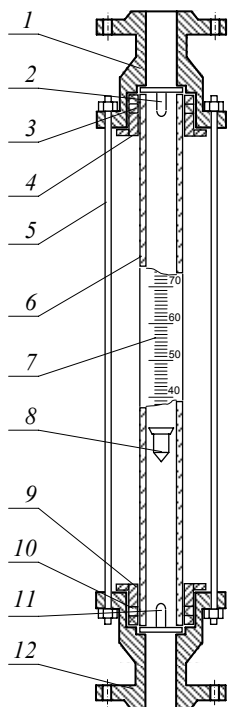


Рис. П.7. Ротаметр стеклянный:
1 и 12 – корпуса; 2 – верхний упор; 3 и 10 – сальниковые уплотнения; 4 и 9 – втулки; 5 – шпилька; 6 – стеклянная трубка; 7 – шкала; 8 – поплавок; 11 – нижний упор

Поплавок ротаметра будет находиться в квазистатическом взвешенном состоянии при условии равенства всех сил, действующих на него в потоке жидкости, а именно: силы тяжести (F_g), архимедовой силы (F_A) и силы сопротивления со стороны обтекающего его потока (F_c), то есть когда $F_g = F_A + F_c$.

Сила тяжести и архимедова сила для данного поплавка постоянны. Сила сопротивления пропорциональна скорости обтекающего потока:

$$F_c = \zeta \frac{\rho v^2}{2} S_n,$$

где ζ – коэффициент пропорциональности, ρ – плотность жидкости, S_n – площадь поперечного сечения поплавка.

Таким образом, баланс сил обеспечивается определенной скоростью потока v .

Согласно уравнению расхода жидкости в канале круглого поперечного сечения

$$\dot{V} = v \pi d^2 / 4,$$

постоянство скорости

при изменении расхода может быть достигнуто изменением диаметра канала (d). Именно с этой целью трубка ротаметра имеет коническую форму.

Штангенциркуль – инструмент для измерения линейных размеров тел с точностью до десятых долей миллиметра.

Название инструмента происходит от нем. Stange – стержень, штанга и Zirkel – циркуль.

Устройство штангенциркуля показано на рис. П.8.

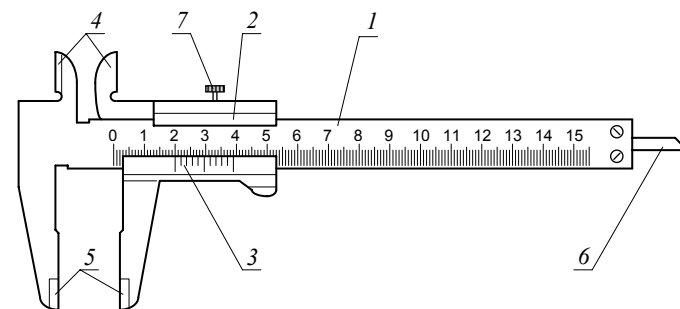


Рис. П.8. Штангенциркуль:
1 – штанга; 2 – рамка; 3 – нониус; 4 – верхние губки; 5 – нижние губки; 6 – линейка глубиномера; 7 – стопорный винт

Основная часть инструмента – штанга 1 со шкалой, имеющей сантиметровые и миллиметровые деления. На одном конце штанги располагаются верхняя 4 и нижняя 5 губки.

По линейке скользит рамка 2, также имеющая верхнюю и нижнюю губки. На рамку нанесена шкала – нониус 3.

При смыкании нижних губок нулевой штрих нониуса совмещается с нулевым штрихом шкалы на штанге. При смещении рамки по штанге расстояния между внешними кромками верхних губок, между внутренними кромками нижних губок и длина выдвигаемой линейки глубиномера 6 одинаковы.

Для определения внешнего размера тела его зажимают между нижними губками инструмента и по положению нулевого штриха нониуса определяют целое число миллиметров. Затем определяют, какой из штрихов шкалы нониуса, считая от нулевого, точно совпадает со штрихом шкалы на штанге; полученное число соответствует числу десятых долей миллиметра. Размер тела получают сложением числа целых и числа десятых долей миллиметра.

Условные обозначения контрольно-измерительных приборов на схемах лабораторных установок

Условные обозначения приборов и средств автоматизации стандартизированы только для схем технологических процессов. Тем не менее, известные стандарты внедрены в лабораторном практикуме при начертании схем лабораторных установок.

Из двух способов изображения средств контроля — развёрнутого и упрощённого — здесь рекомендуется применять упрощённый способ.

При упрощённом способе изображения средств автоматического контроля и регулирования параметров процесса на схеме не показываются первичные измерительные преобразователи и вся вспомогательная аппаратура.

Приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции и выполненные в виде отдельных блоков, изображаются одним условным графическим обозначением в виде круга $\varnothing 10$ мм с горизонтальной диаметальной линией. Этот круг соединяется тонкой сплошной линией с точкой отбора импульса в технологическом оборудовании.

В верхней половине круга приводятся обозначения измеряемых или регулируемых параметров, уточняющих значения измеряемых величин, а также обозначения функций, выполняемых прибором.

В приведённой ниже таблице указаны некоторые обозначения (символы) измеряемых или регулируемых параметров (в алфавитном порядке) и обозначение (символ) уточнения измеряемой величины. Для лучшего усвоения этих символов в таблице приводятся их английские этимоны.

Символ	П а р а м е т р	Этимон символа
E	Любая электрическая величина	Electrical – электрический
F	Расход	Flow – поток
L	Уровень	Level – уровень
M	Влажность	Moisture – влажность
P	Давление	Pressure – давление
S	Скорость, частота	Speed – скорость
T	Температура	Temperature – температура
Q	Концентрация, состав	Quality – качество
W	Масса	Weight – вес
d	Разность величин	difference – разность

В следующей таблице указаны обозначения (символы) функций, выполняемых приборами. Для лучшего усвоения символов в этой таблице также приводятся их английские этимоны.

Символ	Ф у н к ц и я	Этимон символа
I	Показание (индикация)	Indication – индикация
R	Регистрация	Registration – регистрация
C	Регулирование	Control – регулирование
S	Включение; переключение	Switch – переключение

В нижней половине круга, являющегося графическим изображением прибора, указывается номер позиции этого контрольно-измерительного устройства на схеме.

На рис. П.9 приводится пример изображения приборов на схеме лабораторной установки.

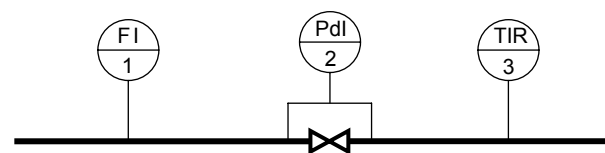


Рис. П.9. Изображение контрольно-измерительных приборов на схеме лабораторной установки:
1 – индикация расхода; 2 – индикация разности давлений на регулирующем вентиле; 3 – индикация и регистрация температуры

Опознавательная окраска трубопроводов

В химической промышленности трубопроводы окрашиваются в опознавательные цвета для быстрого определения их содержимого и облегчения управления производственным процессом. Опознавательная окраска способствует также безопасной эксплуатации технологического оборудования.

Действующими нормативными документами регламентируется окраска оборудования в тот или иной цвет в зависимости от химической природы среды и её состояния внутри трубопроводов и аппаратов.

В учебных лабораториях кафедры «Процессов и аппаратов химической технологии» РХТУ имени Д. И. Менделеева с теми же целями, что и в промышленности, также применена опознавательная окраска трубопроводов.

Цвета применённой в лаборатории окраски в основном соответствуют стандарту и приводятся в следующей таблице:

Цвет	Среда	Цвет	Среда
Зелёный	Вода водопроводная	Серый	Пар водяной
Красный	Вода, получившая дополнительную энергию (механическую или тепловую)	Синий	Воздух
Чёрный	Канализация	Жёлтый	Газ природный

Физические свойства воды на линии насыщения

t , °C	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^3$, Па·с	β , К ⁻¹	h' , кДж/кг	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	Pr
0	999,8	1,793	-0,683	0,0	4217,6	0,5665	13,33
1	1000,0	1,732	-0,503	4,2	4214,0	0,5683	12,84
2	999,9	1,675	-0,328	8,4	4210,7	0,5701	12,37
3	1000,0	1,621	-0,160	12,6	4207,7	0,5718	11,93
4	1000,0	1,569	0,003	16,8	4204,8	0,5735	11,51
5	1000,0	1,520	0,161	21,0	4202,2	0,5751	11,11
6	999,9	1,474	0,313	25,2	4199,9	0,5767	10,74
7	999,9	1,429	0,461	29,4	4197,7	0,5783	10,37
8	999,8	1,387	0,605	33,6	4195,6	0,5798	10,04
9	998,8	1,347	0,744	37,8	4193,8	0,5813	9,718
10	999,7	1,308	0,880	42,0	4192,1	0,5828	9,408
11	999,6	1,271	1,012	46,2	4190,6	0,5844	9,115
12	999,5	1,236	1,141	50,4	4189,2	0,5859	8,836
13	999,4	1,202	1,267	54,6	4187,9	0,5875	8,570
14	999,2	1,1699	1,389	58,8	4186,7	0,5891	8,315
15	999,1	1,1391	1,509	62,9	4185,6	0,5906	8,073
16	998,9	1,1095	1,626	67,1	4184,7	0,5922	7,840
17	998,8	1,0811	1,740	71,3	4183,8	0,5937	7,618
18	998,6	1,0539	1,851	75,5	4183,0	0,5953	7,406
19	998,4	1,0278	1,961	79,7	4182,3	0,5968	7,202
20	998,2	1,0026	2,068	83,9	4181,7	0,5983	7,007
21	998,0	0,9785	2,173	88,0	4181,2	0,5999	6,820
22	997,8	0,9553	2,275	92,2	4180,7	0,6014	6,641
23	997,5	0,9330	2,376	96,4	4180,2	0,6029	6,468
24	997,3	0,9115	2,475	100,6	4179,8	0,6044	6,303
25	997,0	0,8907	2,572	104,8	4179,5	0,6059	6,144
26	996,8	0,8708	2,667	109,0	4179,2	0,6074	5,991
27	996,5	0,8515	2,761	113,1	4179,0	0,6089	5,844
28	996,2	0,8330	2,853	117,3	4178,8	0,6104	5,703
29	995,9	0,8150	2,944	121,5	4178,6	0,6119	5,566
30	995,6	0,7977	3,033	125,7	4178,5	0,6133	5,435
31	995,3	0,7810	3,120	129,8	4178,4	0,6148	5,309
32	995,0	0,7649	3,206	134,0	4178,3	0,6162	5,187
33	994,7	0,7493	3,291	138,2	4178,3	0,6176	5,069
34	994,4	0,7342	3,375	142,4	4178,2	0,6190	4,955
35	994,0	0,7196	3,457	146,6	4178,2	0,6204	4,846

Физические свойства сухого воздуха

($p = 100 \text{ кПа} = 750 \text{ мм рт. ст.}$)

t , °C	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	Pr
15	1,209	17,91	1006	0,0252	0,714
16	1,205	17,95	1006	0,0253	
17	1,201	18,00	1006	0,0254	
18	1,197	18,05	1006	0,0254	
19	1,193	18,10	1006	0,0255	
20	1,189	18,15	1006	0,0256	
21	1,185	18,20	1006	0,0256	
22	1,181	18,24	1006	0,0257	
23	1,177	18,29	1006	0,0258	
24	1,173	18,34	1006	0,0258	
25	1,169	18,39	1006	0,0259	
26	1,165	18,43	1006	0,0260	
27	1,161	18,48	1006	0,0260	
28	1,157	18,53	1006	0,0261	
29	1,153	18,58	1006	0,0262	
30	1,150	18,62	1006	0,0262	
31	1,146	18,67	1006	0,0263	
32	1,142	18,72	1006	0,0264	
33	1,138	18,77	1006	0,0264	
34	1,135	18,81	1006	0,0265	
35	1,131	18,86	1006	0,0266	

Физические свойства воздуха (плотность ρ , динамическая вязкость μ , теплопроводность λ) при температурах и давлениях, не приведённых в таблице, с достаточной точностью могут быть рассчитаны по формулам:

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}; \quad (\text{П.3})$$

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5}; \quad (\text{П.4})$$

$$\lambda = \lambda_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5}, \quad (\text{П.5})$$

где $\rho_0 = 1,2928 \text{ кг/м}^3$; $\mu_0 = 17,17 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}$; $\lambda_0 = 0,0242 \text{ Вт/(м·К)}$ – свойства воздуха при $T_0 = 273,15 \text{ К}$ и $p_0 = 101325 \text{ Па}$; $C = 112,0 \text{ К}$ – константа Сазерленда для воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: Учебник для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1984.– 640 с.
2. Чугаев Р. Р. Гидравлика: Учебник для вузов.– 4-е изд., доп. и перераб.– Л.: Энергоиздат, 1982.– 672 с.
3. Жужиков В. А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий.– 4-е изд., доп. и перераб.– М.: Химия, 1980.– 398 с.
4. Тодес О. М., Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы.– Л.: Химия, 1981.– 296 с.
5. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств: Учеб. пособие для вузов.– М.: Высш. школа, 1991.– 400 с.
6. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов/ Под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова.– 10-е изд., перераб. и доп.– Л.: Химия, 1987.– 576 с.

Оглавление

Предисловие	3
Символы, наименования и единицы измерения основных физических величин	4
1.1. Гидродинамические режимы течения жидкости	6
1.2. Профиль скоростей в сечении трубопровода	9
1.3. Гидравлическое сопротивление трубопровода	15
1.4. Характеристики гидравлической машины для перемещения жидкости.	20
1.5. Гидравлическое сопротивление пористых материалов при фильтровании суспензии	27
1.6. Гидродинамика псевдооживленного зернистого слоя.	32
1.7. Скорость гравитационного осаждения частиц	37
1.8. Гидродинамическая структура потока в аппарате с мешалкой	42
Приложение	48
Инструменты и приборы, используемые при выполнении лабораторного практикума	48
Условные обозначения контрольно-измерительных приборов на схемах лабораторных установок	57
Опознавательная окраска трубопроводов	59
Физические свойства воды на линии насыщения	60
Физические свойства сухого воздуха	61
Библиографический список	62

Учебное издание

БОБЫЛЁВ Владимир Николаевич

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ

Редактор Г. П. Романова

Лицензия ЛР № 020714 от 02.02.98

Подписано в печать 01.04.05. Формат 60×84 1/16

Бумага SvetoCopy. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 250 экз.

Заказ № 67

Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева

Издательский центр

Адрес университета и издательского центра
125047 Москва, Миусская пл., 9