

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

Лабораторный практикум по курсу «Гидравлика»

Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов обучающихся по направлениям подготовки: 35.03.06 Агроинженерия, 23.03.01 Технология транспортных процессов, 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), 20.03.02 Природообустройство и водопользование

Новосибирск 2023

УДК 532.5(075.8):622.5
ББК 30.123

Гидравлика. Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов обучающихся по направлениям подготовки: 35.03.06 Агроинженерия, 23.03.01 Технология транспортных процессов, 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), 20.03.02 Природообустройство и водопользование, сост.: Диденко А.А., Христенко А.Г., Пшенов Е.А. – Новосибирск, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, Инженер. ин-т., 2023. – 84 с.

Рецензент – к.т.н., доцент Булаев Е.В.

Рекомендована к изданию методическим советом Инженерного института Новосибирский ГАУ, 2023 (протокол №8 от 28.03.2023).

© Новосибирский государственный аграрный университет, 2023

© Инженерный институт, 2023

Содержание

Введение	
Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента внутреннего трения в жидкости методом Стокса	6
Лабораторная работа № 2. Исследование работы гидростатических машин	13
Лабораторная работа № 3. Измерение гидростатического давления	19
Лабораторная работа № 4. Исследование относительного покоя жидкости	28
Лабораторная работа № 5. Определение критического значения числа	31
Лабораторная работа № 6. Экспериментальная иллюстрация уравнения Бернулли	36
Лабораторная работа № 7. Измерение расхода жидкости	43
Лабораторная работа № 8. Определение коэффициента гидравлического трения	60
Лабораторная работа № 9. Экспериментальное изучение прямого гидравлического удара в напорном трубопроводе	67
Лабораторная работа № 10. Исследование нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель	71
Лабораторная работа № 11. Исследование работы центробежного насоса	76
Библиографический список	83

ВВЕДЕНИЕ

Современная гидравлика является технической наукой. Предметом гидравлики служат жидкости и законы, действующие в них и используемые преимущественно при решении разнообразных вопросов инженерной практики, как, например, при расчетах потоков в трубопроводах, гидротехнических сооружений, гидравлических машин и т.д.

Гидравлика делится на 2 части: гидростатику и гидродинамику. Гидростатика изучает законы движения жидкостей и взаимодействие их с соприкасающимися с ними покоящимися или движущимися твердыми телами.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При проведении лабораторных работ необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

- перед пуском убедиться в исправности лабораторных установок, отсутствии посторонних предметов в камерах рабочих органов, надежном креплении откидных крышек и люков;
- подать сигнал о пуске лабораторной установки;
- во время работы один из студентов должен быть рядом с кнопкой «СТОП»;
- запрещается производить запуск установки в отсутствие преподавателя, а также приводить в действие лабораторные установки с ручным приводом;
- при изучении лабораторных установок обязательна надежная фиксация откидных крышек и люков в открытом положении и отключенном рубильнике электросети питающей установку.

Ознакомление с правилами техники безопасности каждый студент подтверждает подписью в журнале инструктажа на рабочем месте.

Общие требования к оформлению выполненных работ

Для успешного выполнения и представления к защите выполненных работ необходимо соблюдать следующие требования:

1. Обучающийся допускается к выполнению работы после усвоения необходимых теоретических сведений и подготовки бланка отчета.
2. Выполненные работы оформляются в виде отчета.
3. Отчет о каждой отдельной работе должен содержать порядковый номер, название и цель работы, описание приборов и оборудования, основные сведения, схемы изучаемых конструкций машин и лабораторных установок, расчетные формулы (при необходимости), таблицы для записи результатов измерений и вычислений, выводы с оценкой полученных результатов.
4. Таблицы и иллюстрации (рисунки, схемы, графики) нумеруются последовательно в пределах каждой отдельной работы. Например, «Таблица 1.3» (третья таблица первой работы) или «Рисунок 2.1» (первый рисунок второй работы). После номера следует название таблицы и рисунка. Номер и название таблицы помещают непосредственно над таблицей, а номер и название рисунка - под иллюстрацией.

Поясняющий текст, в котором расшифровываются принятые условные обозначения на рисунке, помещают непосредственно под иллюстрацией перед номером и названием рисунка.

5. Вычисления должны представляться в развернутой форме с указанием единиц измерения величин на всех этапах расчета.

6. Результаты измерений физических величин необходимо представлять с точностью, соответствующей точности применяемого средства измерения.

Лабораторная работа № 1 (4 часа)

Определение коэффициента внутреннего трения в жидкости методом Стокса

Цель работы: Определить коэффициент внутреннего трения в исследуемой жидкости по измеренной скорости падения шарика в ней.

Приборы и оборудование: Стеклоцилиндр с исследуемой жидкостью, штангельциркуль, секундомер, масштабная линейка, свинцовые шарики.

Основные сведения

Явлением внутреннего трения (вязкостью) называется появление сил трения $f_{\text{вп}}$ между слоями газа или жидкости, движущимися относительно друг друга параллельно с различными по величине скоростями. Вследствие обмена молекулами за счет их хаотического теплового движения более быстрый слой ускоряет соседний с ним медленный слой, и, наоборот, медленный слой задерживает более быстрый. Силы внутреннего трения направлены по касательным к слоям газа или жидкости.

Скорость беспорядочного теплового движения молекул V в текущем газе (или жидкости) в среднем одинакова во всех точках рассматриваемого пространства, но скорость направленного движения \vec{U} одинакова только для молекул данного слоя газа (или жидкости) и различна для различных слоев. Молекулы, перелетая, благодаря тепловому движению, из более быстрого слоя в медленный, приносят с собой большую, чем в медленном слое, составляющую импульса направленного движения mU_2 и тем самым ускоряют медленный слой. Наоборот, молекулы, попадающие из медленного слоя в более быстрый, имеют меньшую составляющую импульса mU_1 , в результате чего они уменьшают скорость более быстрого слоя.

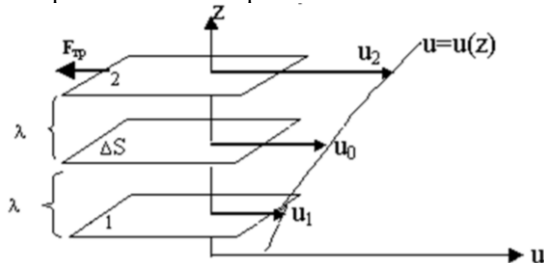


Рисунок 1 – Зависимость скорости течения жидкости от координаты

Мысленно выделим в газе площадку ΔS (рис.1), параллельную слоям, текущим с различными скоростями U .

Пусть слой 1 лежит под площадкой ΔS на расстоянии средней длины свободного пробега молекул λ . Тогда молекулы, летящие из слоя 1 по направлению к площадке ΔS , достигнут ее без столкновений. Число молекул Δn , пролетающих через площадку ΔS за время Δt из слоя 1:

$$\Delta n = \frac{1}{6} n_0 \Delta S V \Delta t, \quad (1)$$

где V - средняя скорость теплового движения молекул, n_0 – число молекул в единице объема. Множитель $1/6$ учитывает равновероятность движения молекул обоих направлений каждой из координатных осей.

Такое же количество молекул из слоя 2 пересекает площадку ΔS в противоположном направлении. Но, поскольку скорости U_1 и U_2 слоев 1 и 2 различны, то в прямом и обратном направлениях будут перенесены различные импульсы ΔK_1 и ΔK_2 направленного движения:

$$\Delta K_1 = \frac{1}{6} n_0 V \Delta t \Delta S m U_1, \quad (2)$$

$$\Delta K_2 = \frac{1}{6} n_0 V \Delta t \Delta S m U_2, \quad (3)$$

где m - масса молекулы.

В результате этих двух переносов импульса, происходящих в противоположных направлениях, через площадку ΔS будет перенесен от слоя 2 слою 1 импульс

$$\Delta K = \Delta K_2 - \Delta K_1 = \frac{1}{6} n_0 V \Delta S \Delta t (m U_2 - m U_1). \quad (4)$$

Разность абсолютных величин скоростей $U_2 - U_1$, можно выразить через градиент скорости U . *Градиент скорости* есть величина, численно равная изменению величины скорости движения слоев на единицу длины в направлении, перпендикулярном поверхности слоя. Для нашего случая градиент скорости равен $\frac{dU}{dZ}$, где $dZ = 2\lambda$ (см. рис.1).

Тогда разность $U_2 - U_1$ равна градиенту скорости, умноженному на расстояние между слоями 1 и 2, т.е. на 2λ .

$$U_2 - U_1 = \left(\frac{dU}{dZ} \right) \cdot 2\lambda, \quad (5)$$

следовательно (4) принимает вид

$$\Delta K = \frac{1}{3} n_0 m \lambda V \left(\frac{dU}{dZ} \right) \lambda. \quad (6)$$

Замечая, что $n_0 m$ есть плотность газа ρ , получим

$$\Delta K = \frac{1}{3} \rho V \lambda \left(\frac{dU}{dZ} \right) \Delta S \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Сила внутреннего трения f_{mp} (рис.1), действующая со стороны более медленного слоя 1 на более быстрый слой 2, согласно второму закону Ньютона равна приращению импульса слоя 2 в единицу времени

$$f_{mp} = \frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{1}{3} \rho V \lambda \left(\frac{dU}{dZ} \right) \Delta S. \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\frac{1}{3} \rho V \lambda \left(\frac{dU}{dZ} \right) \Delta S = \eta. \quad (8a)$$

Тогда

$$f_{mp} = \eta \left(\frac{dU}{dZ} \right) \Delta S. \quad (9)$$

Сила внутреннего трения, возникающего при макроскопических движениях в газе или жидкости, прямо пропорциональна градиенту скорости. Коэффициент пропорциональности η носит название коэффициента внутреннего трения, или динамического коэффициента вязкости.

Коэффициент вязкости (или динамическая вязкость) численно равен силе внутреннего трения, действующей на единицу площади границы раздела параллельно движущихся слоев газа или жидкости, когда скорость их движения изменяется на единицу при перемещении на единицу длины в направлении, перпендикулярном к границе раздела.

Закон (9) был получен Ньютоном из анализа экспериментальных данных и явился основой для изучения движения вязкой жидкости и газа.

Коэффициент вязкости зависит от температуры. Кинетическая теория идеального газа дает следующие выражения для входящих в формулу (8a) величин:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma n_0} \quad - \text{средняя длина свободного пробега молекулы,}$$

где n_0 - число молекул в единице объема, σ - эффективное сечение молекулы.

$$V = \sqrt{\frac{3KT}{m}} \quad - \text{средняя квадратичная скорость движения молекулы,}$$

где K - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, m - масса молекулы.

Кроме того, плотность $\rho = mn_0$.

Подставив все эти выражения в (8a), получим

$$\eta = \frac{1}{3} \rho V \lambda = \frac{1}{3} m n_0 \sqrt{\frac{3KT}{m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \sigma n_0}, \quad (10)$$

т.е. вязкость идеального газа возрастает с ростом температуры.

В жидкости сила трения между слоями описывается тем же уравнением (9), что и в газе, но коэффициент вязкости уменьшается при повышении температуры. Это объясняется тем, что в отличие от идеального газа между молекулами жидкости имеются значительные силы притяжения. Вследствие этого молекулы жидкости большую часть времени находятся около положений равновесия, и перескок молекулы становится возможным при разрыве

межмолекулярной связи. С ростом температуры доля молекул, имеющих связи, уменьшается, в результате чего текучесть жидкости возрастает, а вязкость падает.

Зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры описывается формулой Френкеля

$$\eta = \text{const} \cdot e^{\frac{W}{KT}}, \quad (11)$$

где W – энергия, которую нужно сообщить молекуле жидкости, чтобы она могла перескочить из одного положения равновесия в соседнее. Величина W имеет порядок $(2 \div 3)10^{-20}$ Дж, причем $W > 0$. Вязкость жидкости обычно во много раз больше, чем у газа. С ростом температуры вязкость жидкости экспоненциально уменьшается, а вязкость пара возрастает пропорционально \sqrt{T} , и при критической температуре $T_{кр}$ они становятся одинаковыми (рис. 2).

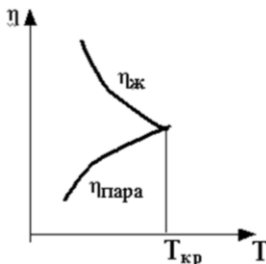


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента вязкости от температуры

Таблица 1 - Вязкость некоторых жидкостей при различных температурах

Вещество	Температура, °С	Вязкость, Н·с·м ⁻²
Вода	0	$1,19 \cdot 10^{-3}$
	20	$1,05 \cdot 10^{-3}$
	50	$0,55 \cdot 10^{-3}$
	100	$0,28 \cdot 10^{-3}$
Ртуть	0	$1,68 \cdot 10^{-3}$
	20	$1,55 \cdot 10^{-3}$
	100	$1,24 \cdot 10^{-3}$
Глицерин	0	13,40
	20	12,1
	50	1,49
	100	0,629

Тела, движущиеся в вязкой жидкости или газе, испытывают сопротивление. Сила сопротивления, испытываемая шаром, прямо пропорциональна вязкости газа (жидкости) η , радиусу шара r и скорости его движения V .

$$f_{mp} = 6\pi\eta rV \quad (12)$$

Формула (12) носит название закона Стокса и применима лишь для тел достаточно малых размеров и малой скорости движения относительно жидкости. Сила сопротивления движению шара в жидкости возникает из-за сил внутреннего трения при течении слоев жидкости, движущихся вместе с шаром, относительно слоев, остающихся неподвижными. Закон Стокса, как и закон Ньютона для вязкости, применим, если течение жидкости ламинарное, т.е. такое, при котором каждый выделенный слой скользит параллельно соседним, не перемешиваясь с ними. Ламинарное течение наблюдается при малых скоростях.

При возрастании скорости в жидкости возникает интенсивное вихреобразование и перемешивание. Такое течение называется турбулентным или вихревым. В этом случае сила сопротивления становится пропорциональной квадрату скорости.

Характер течения жидкости определяется безразмерным числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{r \cdot V \cdot \rho}{\eta} \quad (13)$$

где r - величина, характеризующая линейные размеры тела, обтекаемого жидкостью (газом), V - скорость течения, ρ - плотность жидкости (газа), η - динамическая вязкость.

Если при данных условиях число Re превышает определенное критическое значение, то поток становится турбулентным; при значениях Re меньших критического - ламинарным. Таким образом, число Рейнольдса можно использовать в качестве критерия применимости закона Стокса. Для шарика критическим является $Re = 0,5$.

Рассчитаем по формуле (13) число Рейнольдса для движения шарика в глицерине при условии: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$, $r = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$, $V = 0,2 \text{ м/с}$, $\eta = 0,8 \text{ кг/м.с}$

$$Re = \frac{r \cdot V \cdot \rho}{\eta} = \frac{10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-1} \cdot 1,2 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-1}} = 0,3$$

Так как число Re оказалось меньше 0,5, то закон Стокса в этих условиях применим. Подобные условия должны осуществляться в нашем опыте.

Коэффициент вязкости в работе определяется с помощью наполненного исследуемой жидкостью вертикального стеклянного цилиндра с двумя горизонтальными метками A и A_1 , расположенными друг от друга расстоянии l (рис. 3). Если в исследуемой жидкости падает шарик небольших размеров, то на него действуют три силы: сила тяжести mg , выталкивающая сила $F_{арх}$ и

сила сопротивления, обусловленная вязкостью жидкости f_{mp} . Силу тяжести можно выразить через плотность шарика ρ и его радиус r

$$mg = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g . \quad (14)$$

Выталкивающая сила Архимеда равна

$$F_{арх} = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_1 \cdot g , \quad (15)$$

где ρ_1 – плотность жидкости.

Сила сопротивления f_{mp} определяется по закону Стокса (12).

Все три силы направлены по вертикали: сила тяжести - вниз, выталкивающая сила и сила сопротивления (трения) - вверх (рис. 3).

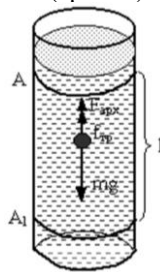


Рисунок 3 – Силы действующие на шарик в падающей жидкости

Пусть в начальный момент времени скорость шарика равна нулю и, следовательно, равна нулю сила трения. Так как сила тяжести больше выталкивающей силы, шарик будет падать ускоренно до тех пор, пока с увеличением скорости сила трения не возрастает настолько, что в сумме с выталкивающей силой станет равной силе тяжести. Равнодействующая трех сил станет равной нулю.

$$P - F_{арх} - f_{mp} = 0 \quad (16)$$

Шарик при этом начнет двигаться с постоянной скоростью V .

Учитывая (3), (4), (5), получим

$$\frac{4}{3}\pi r^2 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g - 6\pi \eta r V = 0 . \quad (17)$$

Решая это уравнение относительно η :

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_1}{V} \text{ или } \eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_1)}{l} g D^2 t , \quad (18)$$

где $V = \frac{l}{t}$ скорость установившегося движения; l - расстояние, пройденное шариком; t - время падения шарика; D – диаметр шарика.



Рисунок 4 –
Лабораторная
установка для
определения
вязкости жидкостей

Описание лабораторной установки

Установка состоит из трех стеклянных цилиндров, заполненных разными жидкостями: водой, маслом и глицерином.

В верхней и нижней части каждого цилиндра имеются метки, фиксирующие расстояние, которое частица проходит в процессе осаждения.

Замеряя время, в течение которого частица проходит расстояние между метками, можно определить скорость осаждения частицы.

С целью исключения влияния начального ускоренного участка движения частицы в жидкости, верхняя метка расположена на 30–40 мм ниже поверхности жидкости.

Порядок выполнения работы

1. Установите верхнюю метку на трубке с исследуемой жидкостью на 3-6 см ниже уровня жидкости, чтобы шарик при падении проходил ее с установившейся скоростью. Нижнюю метку установите на расстоянии 3-6 см от дна трубки и измерьте расстояние между метками по масштабной линейке, укрепленной на трубке.

2. Измерьте 3 раза диаметр шарика штангельциркулем и найдите его среднее значение.

3. Опустите шарик в жидкость и секундомером измерьте время прохождения шариком расстояния l между метками.

4. По формуле (18) определите коэффициент вязкости. Вычисления необходимо проводить в системе СИ. Опыт повторите 3 раза, с различной жидкостью. Все результаты запишите в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты измерений

N	D_1 мм	D_2 мм	D_3 мм	D_{cp} мм	l_i см	t_i с	η_i Н·с/м ²	η_{cp} Н·с/м ²	$\Delta\eta_i$ Н·с/м ²	$(\Delta\eta_i)^2$ Н·с/м ²	$\Sigma(\Delta\eta_i)^2$ Н·с/м ²	$\Delta\eta$ Н·с/м ²	$\eta_{cp} \pm \Delta\eta$ Н·с/м ²
1													
2													
3													

Контрольные вопросы

1. Чему равна и как направлена сила внутреннего трения двух слоев жидкости?
2. Каков физический смысл коэффициента вязкости? Размерность его.
3. Объясните возникновение сил внутреннего трения с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Дайте вывод формулы для силы внутреннего трения.
4. Как зависит от температуры коэффициент вязкости для газа и жидкости? Объясните разницу.
5. Запишите формулу Стокса и объясните, при каких условиях ею можно пользоваться.

Лабораторная работа № 2 (4 часа)

Исследование работы гидростатических машин (на примере гидравлического домкрата)

Цель работы: Определение усилия на штоке силового цилиндра домкрата в зависимости от усилия на рычаге рабочего цилиндра.

Приборы и оборудование: домкрат гидравлический, манометр, штангельциркуль, линейка, рычаг, динамометр.

Основные сведения

Особенная способность жидкости передавать усилия на расстояние широко используется в технике, например, в гидростатических машинах домкратах, гидропрессах, гидроаккумуляторах, гидромultiпликаторах и др.), в случаях, когда их рабочие органы находятся в состоянии предельного равновесия.

Домкраты и гидропрессы применяют для получения больших подъёмных и сжимающих усилий, что необходимо, например, для ремонта сельскохозяйственной техники и деформации металлов при обработке давлением (прессование, ковка, штамповка), при испытании различных материалов, уплотнении рыхлых материалов, в технологических процессах по обезвоживанию осадков и т.д.

Рассмотрим домкрат (пресс), состоящий из двух сообщающихся цилиндров, поршни которых имеют разную площадь (рис. 5).

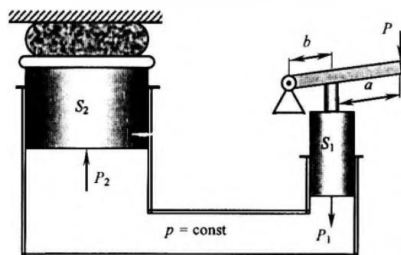


Рисунок 5 - Принципиальная схема гидравлического домкрата (пресса)
 P_1 - сила, с которой оказывается воздействие на поршень малого цилиндра;
 P_2 - сила, с которой поршень большого цилиндра оказывает воздействие на обрабатываемый предмет (рабочее усилие)

При воздействии силы P_1 на поршень узкого цилиндра площадью S_1 , под поршнем создаётся давление $p_1 = P_1/S_1$, которое по закону Паскаля передаётся жидкостью во все точки одинаково, в т.ч. и на поршень широкого цилиндра площадью S_2 , т.е. $p_2 = P_2/S_2$. При этом давление создаёт полезную силу $P_2 = p_2 \cdot S_2$, под действием которой прессуется материал. Следовательно,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{S_1}{S_2} \quad \text{или} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (19)$$

Из формулы (1.1) видно, что отношение усилий на малом и большом поршнях пропорционально отношению площадей и квадрату отношения диаметров поршней.

Рабочее усилие, создаваемое гидропрессом:

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \quad (20)$$

Следовательно, с помощью гидропресса сила, действующая на обрабатываемый объект, увеличивается во столько раз, во сколько площадь поршня большого цилиндра превышает площадь малого.

Рассмотрим гидропресс, состоящий двух сообщающихся цилиндров с поршнями малого d_1 и большого d_2 диаметров (рис. 6). Первый поршень (малого диаметра) соединён с рычагом размерами, a и b , имеющим в точке O неподвижную шарнирную опору. Второй поршень (большого диаметра) с цилиндром установлен под платформой, на которую помещается прессуемое тело. Рычаг приводится вручную или с помощью специального двигателя.

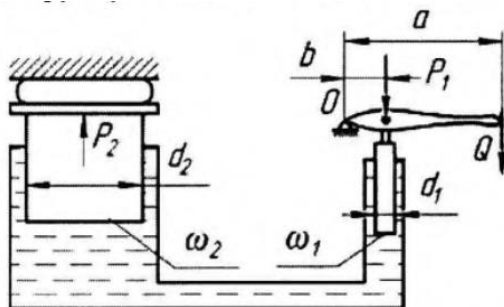


Рисунок 6 - Схема гидравлического домкрата (пресса)

Рассматривая равновесие рычага, составим уравнение моментов относительно точки O и найдём силу воздействия поршня малого диаметра на свободную поверхность жидкости в цилиндре:

$$P_1 = Q \cdot \frac{a}{b} \quad (21)$$

где: Q - усилие на рычаге, Н.

В результате этого по всему объёму жидкости внешнее давление передаётся без изменения. При этом давление от малого поршня передаётся на большой поршень, причём сила давления на большой поршень:

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \quad (22)$$

где S_1 - площадь малого поршня, m^2 ;

S_2 - площадь большого поршня, m^2 .

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}; S_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \quad (23)$$

d_1 - диаметр малого поршня, м;

d_2 - диаметр большого поршня, м.

После подстановки значений формул (21), (22) и (23) получим:

$$P_2 = P_1 \cdot Q \cdot \frac{a}{b} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \quad (24)$$

или с учётом потерь энергии на трение в движущихся частях, так называемого КПД $\eta = 0,80-0,85$, окончательно найдём:

$$P_2 = P_1 \cdot Q \cdot \frac{a}{b} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \cdot \eta \quad (25)$$

Гидроаккумулятор - машина, которая позволяет постепенно накопить часть энергии, чтобы потом быстро отдать её. Накапливаемую в гидроаккумуляторе энергию аккумулирует сжатый газ либо пружина, а затем посылает её в гидросистему посредством жидкостного потока, находящегося

под сильнейшим давлением (рис. 6). Гидроаккумуляторы имеют механические или пневматические накопительные устройства. Механические системы делятся на грузовые и пружинные. В грузовых устройствах энергия накапливается благодаря потенциальной энергии, которая сосредоточена в грузе, размещённом на некоторой высоте. Пружинные агрегаты накапливают энергию механическим способом путём сжатия пружины. Пневмогидроаккумуляторы копят энергетический потенциал при помощи сжатого газа, в роли которого может выступить азот или воздух.

Гидроаккумуляторы применяются в устройствах, предназначенных для водоснабжения и отопления помещений, в т. ч. для формирования требуемого напора в трубах и защиты от гидравлического удара, для рекуперации энергии, оперативного приведения в рабочее состояние двигателя, выполнения роли трансмиссии. В авиации устройство применяется как альтернатива прочим аварийным источникам энергии в момент отказа или поломки главной гидросистемы.

В гидравлическом аккумуляторе (см. рис.7) за счёт поднятия груза на величину рабочего хода поршня можно накопить потенциальную энергию (без учёта веса подвижных частей аккумулятора) по формуле:

$$E_n = G \cdot h \quad (26)$$

где: G – вес груза, Н;

h – смещение поршня, м.

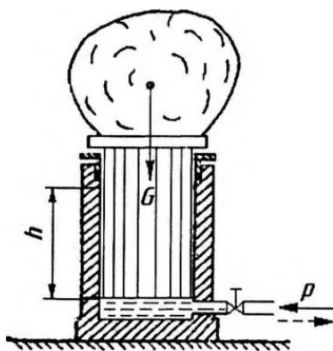


Рисунок 7 - Принципиальная схема гидравлического аккумулятора

Гидромультипликатор - машина, предназначенная для увеличения давления. Он состоит из двух цилиндров разного размера, поршни которых, имеющие площадь S_1 и S_2 соединены друг с другом штоком (рис. 8).

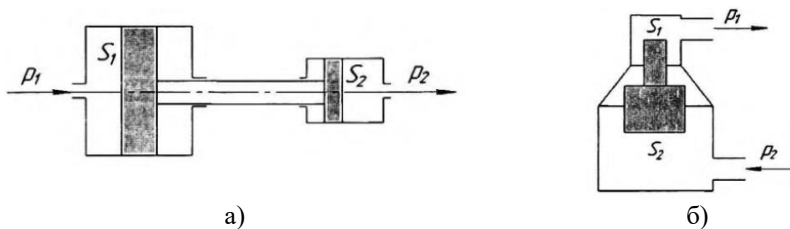


Рисунок 8 - Принципиальная схема гидравлического мультипликатора
 а - поршневого типа; б - плунжерного типа; p_1 - давление, создаваемое, например, насосом; p_2 - рабочее давление, создаваемое мультипликатором

В состоянии предельного равновесия поршни неподвижны, поэтому силы, создаваемые давлениями в обоих цилиндрах, будут равны, т. е. $P_1 = P_2$ или $p_1 \cdot S_1 = p_2 \cdot S_2$, откуда

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \quad (27)$$

Таким образом, мультипликатор увеличивают давление в столько раз, во сколько площадь большего поршня превышает площадь малого.

Описание лабораторной установки



Рисунок 9 – Лабораторная установка для исследования работы гидравлического домкрата

1 – домкрат гидравлический, 2 – манометр, рычаг, динамометр

Таблица 3 – Результаты измерений

№	Р ман, кгс/см ²	Параметры рукоятки		D, мм	d, мм
		a, мм	b, мм		
1					
2					
3					

Порядок выполнения работы

1.1 Определим силу давления F_d на рабочем цилиндре из уравнения:

$$P = \frac{F}{S}, \text{ Па} \quad (28)$$

где F – сила давления, Н;

S – площадь давления, м²

1.2 По формуле (28) определим силу давления F_D на силовом цилиндре из уравнения, полученные данные занести в таблицу 4.

1.3 Определить усилие, прикладываемое к рукоятке F_p из уравнения моментов (см. рис. 10):

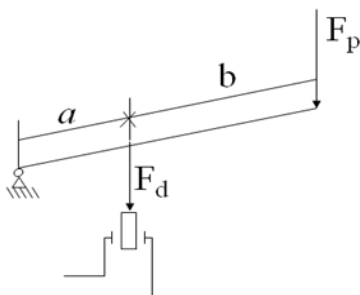


Рисунок 10 – Схема сил, действующих на рукоятку

$$F_p \cdot (a + b) > F_d \cdot a \quad (29)$$

где F_p – усилие на рукоятке, Н;

a – расстояние от неподвижной точки до рабочего поршня;

b – расстояние от рабочего поршня до края рукоятки.

Таблица 4 – Результаты расчетов.

№	F_D , Н	F_d , Н	F_p , Н
1			
2			
3			

По полученным данным строится график зависимости усилия на силовом цилиндре F_D от усилия на рукоятке F_p и делается вывод.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Паскаля.
2. Назовите единицы измерения давления. Перевод давления в разные единицы.
3. Какие гидравлические устройства основаны на законе Паскаля?
4. Устройство лабораторного стенда?

Лабораторная работа № 3 (4 часа)

Измерение гидростатического давления

Цель работы:

- измерить с помощью пружинного манометра гидростатическое давление для трех уровней жидкости в трубках, находящейся в абсолютном покое под действием силы тяжести;
- найти погрешность теоретических и практических измерений гидростатического давления.

Приборы и оборудование: сообщающиеся резервуары, компрессор, манометр, мерная рулетка

Основные сведения

Гидростатическим давлением называют нормальное сжимающее напряжение в неподвижной жидкости, т. е. силу, действующую на единицу площади поверхности. За единицу измерения давления в международной системе принят паскаль ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$).

Различают абсолютное (полное), атмосферное (барометрическое) и избыточное (манометрическое и вакуумметрическое) давления.

Абсолютное (полное) давление $p_{\text{абс}}$ отсчитывается от абсолютного нуля - абсолютного вакуума. Атмосферное давление p_a создается силой тяжести воздуха атмосферы и принимается в обычных условиях равным 101325 Па или 760 мм. рт. ст. Превышение избыточного давления над атмосферным называют манометрическим давлением:

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_a \quad (30)$$

а его недостаток до атмосферного давления - вакуумметрическим давлением:

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_{\text{абс}} \quad (31)$$

Абсолютное давление в любой точке покоящейся жидкости определяется по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h \quad (32)$$

где: p_0 – абсолютное давление на свободной поверхности жидкости;
 h – глубина погружения точки под свободной поверхностью.

Приборы для измерения давления по принципу действия и типу рабочего элемента подразделяются на жидкостные, механические (деформационные и грузопоршневые) и электрические (рис. 11).



Рисунок 11 – Виды приборов для измерения давления по принципу действия

Работа жидкостных приборов основана на законах гидростатики. Жидкостные приборы исторически стали применяться первыми. Действие жидкостных приборов основано на принципе уравнивания измеряемого давления p силой тяжести столба жидкости высотой h в приборе:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (33)$$

где: ρ - плотность жидкости, кг/м^3 ;

g - ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

h - высота столба жидкости, м.

Поэтому величина давления может быть выражена высотой столба жидкости h в единицах длины:

- миллиметрах (мм вод. ст.) и метрах водяного столба (м вод. ст.);
- миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.).

При пересчёте значений давления, выраженного в высоте жидкостного столба, в единицы системы СИ, пользуются выражением (2.4), при этом принимают плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ при температуре 4°C ; плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13596 \text{ кг/м}^3$ при температуре 0°C . Соответственно:

- 1 мм вод. ст. = 9,80655 Па;
- 1 мм рт. ст. = 133,322 Па;
- 750 мм рт. ст. = $1,02 \cdot 10^4$ мм вод. ст. = 1 бар = 10^5 Па.

Преимущества жидкостных приборов:

- а) простота конструкции; б) высокая точность измерения.

Недостатки:

- а) малая механическая прочность; б) малейшая вибрация резко снижает точность измерения; в) косвенный метод измерения давления; г) низкий верхний предел измеряемого давления; д) удобны только при измерении небольших давлений.

Работа деформационных (показывающих) приборов основана на законе Гука. В этих приборах измеряемое давление вызывает деформацию упругого чувствительного элемента (изогнутой трубки, мембраны или сильфона), которая с помощью специальных механизмов передаётся на указатель.

Преимущества: а) большие пределы измерения давления; б) высокая механическая прочность; в) компактность; г) удобство прямого измерения.

Недостатки: а) сложность изготовления; б) меньшая точность; в) «старение» упругого элемента, вызывающее необходимость регулярной поверки.

В грузопоршневых приборах измеряемое давление уравнивается давлением поршня с грузом. Обладают высокой точностью, используются как образцовые для поверки технических и лабораторных приборов.

Приборы по типу измеряемого давления делятся на две группы:

- манометры абсолютного давления, обеспечивающие измерение абсолютного давления в изолированной среде («0» шкалы соответствует давлению в полном вакууме), в том числе барометры (рис. 12);

- приборы избыточного давления: манометры, вакуумметры и мановакуумметры («0» шкалы соответствует атмосферному давлению).

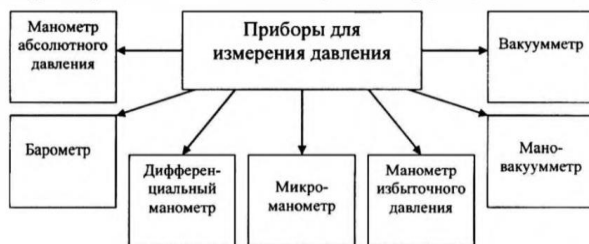


Рисунок 12 - Приборы для измерения различных типов давления

Барометр - прибор для измерения атмосферного давления; манометр-прибор для измерения положительного (манометрического) избыточного давления; вакуумметр - прибор для измерения отрицательного (вакуумметрического) избыточного давления; мановакуумметр - прибор для измерения положительного и отрицательного избыточного давления; дифференциальный манометр (дифманометр) - манометр для измерения разности двух давлений (отличных от атмосферного); микроманометр - дифманометр для измерения малой разности двух давлений (указанная разность значительно меньше значений самих давлений).

Простейшим жидкостным прибором для измерения давления является однотрубный манометр - пьезометр, представляющий собой вертикально установленную относительно измерительной шкалы прозрачную трубку диаметром не менее 6-8 мм. Верхний торец трубки сообщён с атмосферой, а нижний - с отверстием в стенке сосуда, находящимся на глубине от свободной поверхности жидкости, где измеряют избыточное давление. Пьезометры применяют для измерения малых давлений (десятых и сотых долей атмосферного).

Отличие жидкостных манометров от пьезометров заключается в том, что в них измеряемое давление уравнивается столбом жидкости с большим удельным весом (например, ртуть).

Простейшим типом жидкостного манометра является (U-образный манометр (рис. 13), включающий соединённые между собой вертикальные трубки 1 и 2, наполовину заполненные жидкостью.

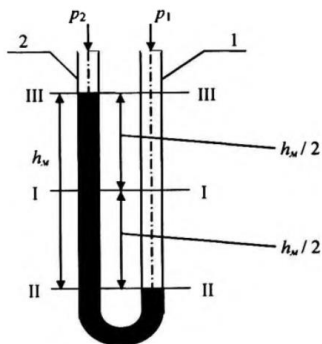


Рисунок 13 - Схема жидкостного U-образного манометра

Если давления в трубках 1 и 2 равны ($p_1 = p_2$), то уровни жидкости выравниваются (уровень I-I).

Если давления разные, например, $p_1 > p_2$, то в трубке 1 уровень жидкости понизится, а в трубке 2 - повысится. В соответствии с выражением (33) на уровне II-II уравнение равновесия имеет вид

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h_m = p_1 - p_2 \quad (34)$$

На рис. 13 приведена схема жидкостного (U-образного манометра) для измерения избыточного давления.

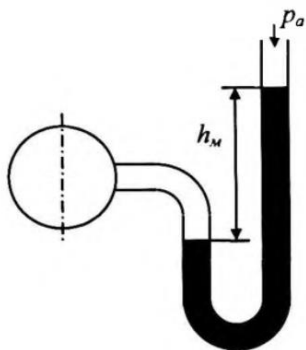


Рисунок 14 - Схема жидкостного U-образного манометра для измерения избыточного давления

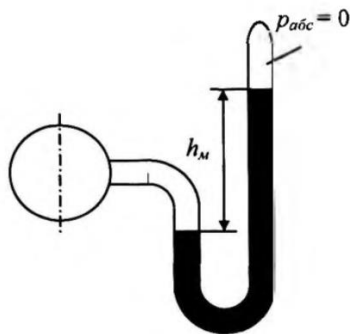


Рисунок 15 - Схема жидкостного U-образного манометра для измерения абсолютного давления

У манометров для измерения абсолютного давления одна из трубок запаяна (рис. 16). При заполнении рабочей жидкостью в полости трубки над жидкостью устанавливается давление, близкое к абсолютному нулю ($p_{abs} = 0$).

Жидкостные манометры для измерения положительного избыточного давления и вакуумметры имеют аналогичную конструкцию. Однако в трубке манометра жидкость (вода или ртуть) перемещается в сторону от избыточного давления, а в трубке вакуумметра - в сторону разрежённого пространства.

В деформационных манометрах давление определяется путём фиксации перемещения заданной точки упругого чувствительного элемента.

Деформационные манометры содержат следующие типы чувствительных элементов: трубчатые пружины, сифоны, мембраны, мембранные коробки.

Трубчатая пружина («Бурдоновская трубка») выполнена в виде тонкостенной трубки, в которой ось имеет форму дуги окружности (рис. 17). Свободный торец трубки запаян. Под действием давления p трубчатая пружина разгибается, и её свободный торец перемещается по дуге (R - радиус пружины; $\Delta\gamma$ - угол поворота свободного торца пружины; l - линейное перемещение свободного торца пружины). При измерении вакуума трубчатая пружина сгибается. Трубчатые пружины бывают одновитковые круговые, многовитковые винтовые, многовитковые спиральные.

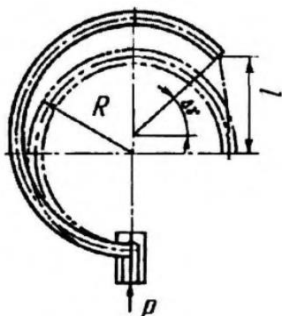


Рисунок 16 - Трубчатая пружина

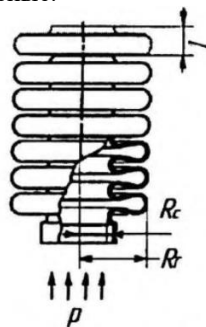


Рисунок 17 - Сифон

Сифон (рис. 16) выполнен в виде тонкостенного цилиндра, имеющего гофрированную боковую поверхность. За счёт наличия гофр увеличивается прогиб сифона под действием давления p (l - линейное перемещение свободного торца сифона; R_c - радиус сифона; R_g - радиус гофры). Сифоны выполняют однослойными и многослойными, сварными и бесшовными.

Мембрана (рис. 18) - упругая пластина в форме диска, жёстко закреплённая по наружному контуру. Прогиб l мембраны зависит от действующего на неё давления p (R - радиус мембраны; h - толщина мембраны). Мембраны бывают плоские тонкостенные и толстостенные, с жёстким центром, гофрированные, с предварительным натяжением.

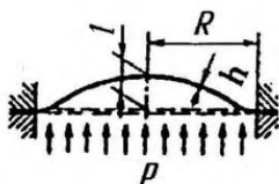


Рисунок 18 - Мембрана

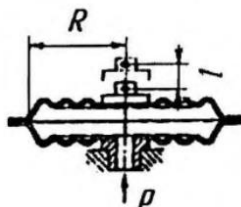


Рисунок 19 - Мембранная коробка

Мембранная коробка (рис. 19) включает две гофрированные мембраны, герметично соединенные по наружному контуру. В результате такого конструктивного исполнения увеличивается прогиб l мембранной коробки под действием давления p (R – радиус мембранной коробки).

Широкое применение нашли деформационные манометры с одновитковой трубчатой пружиной, состоящие из упомянутой одновитковой трубчатой пружины 1 (рис. 20), стрелки 2, закрепленной на оси 3, взаимодействующий с зубчатым сектором 4. Пружина 1 снабжена наконечником 5, взаимодействующим с тягой 6, и одним из торцов соединена с держателем 7. На последнем установлен штуцер 8, посредством которого манометр сообщается с источником давления. Стрелка 2 перемещается относительно шкалы 9, установленной в корпусе 10 манометра. При действии давления внутри трубчатой пружины 1 свободный торец с наконечником 5 перемещается (т.к. пружина разгибается), и указанное перемещение через сегмент 4 преобразуется во вращательное движение оси 3 со стрелкой 2.

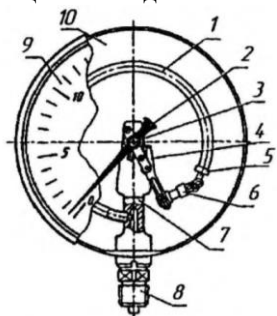


Рисунок 20 – Манометр с одновитковой трубчатой пружиной
1 – трубчатая пружина; 2 – стрелка; 3 – ось; 4 – зубчатый сегмент; 5 – наконечник; 6 – тяга; 7 – держатель; 8 – штуцер; 9 – шкала; 10 – корпус

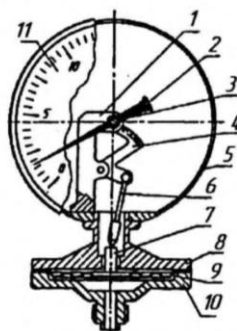


Рисунок 21 – Манометр мембранный
1 – стойка; 2 – стрелка; 3 – ось; 4 – зубчатый сегмент; 5 – корпус; 6 – тяга; 7 – жесткий центр; 8 – верхний фланец; 9 – мембрана; 10 – нижний фланец; 11 – шкала

Мембранный манометр включает стойку 1 (рис. 21), стрелку 2, закреплённую на оси 3, зубчатый сегмент 4, установленные в корпусе 5 манометра. Сегмент 4 при помощи тяги 6 связан с жёстким центром 7. Корпус 5 снабжён верхним фланцем 8, к которому герметично присоединена мембрана 9 посредством нижнего фланца 10. В упомянутом корпусе также расположена шкала 11. При воздействии давления на мембрану 9 перемещается жёсткий центр 7 вместе с тягой 6, и сегмент 4 проворачивается. Одновременно с этим на оси 3 проворачивается стрелка 2 относительно шкалы 11.

При измерении манометром абсолютного давления корпус прибора выполняется герметичным, и с него откачивается воздух; при измерении избыточного давления - корпус сообщён с атмосферой.

Известны также поршневые манометры, представляющие собой приборы, в которых измеряемое давление, действующее на поршень, преобразуется в силу, и определяется по значению силы, необходимой для её уравновешивания. При этом давление уравновешивается массой груза и рассматриваемые приборы называются грузопоршневыми манометрами.

Простейший поршневой манометр включает поршень 1 (рис. 22), расположенный в цилиндре 2. При этом поршень установлен в цилиндре с минимально возможным зазором. Измеряемое давление p действует на нижний торец упомянутого поршня, и уравновешивается силой P , приложенной к верхнему торцу поршня.

Электрические приборы используют для измерения давления в труднодоступных местах механизмов. Такой прибор соединён с трубопроводом 1 (рис. 23), в котором находится рабочее тело (жидкость или газ), давление которого необходимо измерить, и включает тензометрический датчик давления 2, блок усиления сигнала (БУ) 3 и блок питания (БП) 4, регистрирующий прибор (Р) 5. При изменении давления в трубопроводе 1 сигнал от датчика давления 2 усиливается блоком 3 и поступает на регистрирующий прибор 5.

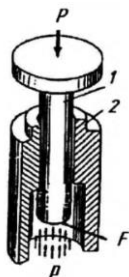


Рисунок 22 - Схема простейшего поршневого манометра
1 - поршень; 2 - цилиндр

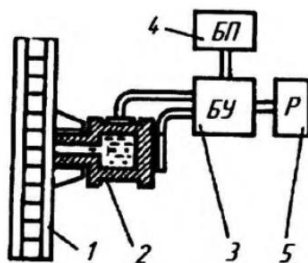


Рисунок 23 - Электрический прибор для измерения давления
1 - трубопровод; 2 - тензометрический датчик давления; 3 - блок усиления сигнала; 4 - блок питания; 5 - регистрирующий прибор

Шкала показывающих приборов градуируется в МПа или в кПа (ранее кгс/см²), т. е. в единицах давления. Для манометров верхний предел избыточного давления изменяется от 0,06 МПа до 1000 МПа, для вакуумметров нижний предел вакуумметрического давления составляет 0,1 МПа. Мановакуумметры имеют нижний предел избыточного давления 0,1 МПа, а верхний - до 4,0 МПа.

Важнейшей характеристикой манометра является класс точности (указывается на циферблате). Манометры бывают следующих классов точности: 0,1; 0,15; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 2,5; 4. Допустимая ошибка измерения давления манометром:

$$\Delta = \frac{K \cdot \Pi}{100} \quad (35)$$

где K – класс точности манометра;

Π – верхний предел измерения давления.

Для измерения давления с повышенной точностью используют образцовые манометры. Образцовые манометры имеют класс точности 0,1; 0,15; 0,25 или 0,4.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 24) состоит из двух сообщающихся стеклянных трубок. Одна из трубок сообщается с атмосферой, а вторая подключена к компрессору. Таким образом имеется возможность изменять давление на свободной поверхности в одной из трубок. Величина давления сжатого воздуха регистрируется с помощью манометра.

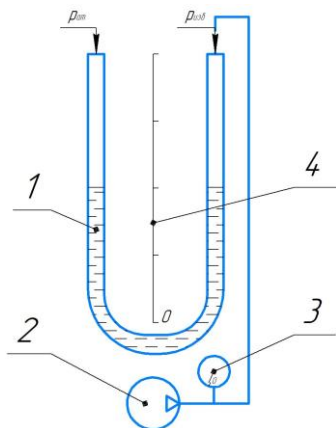


Рисунок 24– Схема лабораторной установки для измерения гидростатического давления

1 – сообщающиеся резервуары, 2 – компрессор, 3 – манометр, 4 – мерная шкала

Порядок выполнения работы

Необходимо выполнить три опыта при различных уровнях высоты столба жидкости в цилиндрических трубках данные внести в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты измерений

№ п/п	Показания манометра, $P_{\text{ман}}$, кгс/см ²	h, м	Плотность жидкости, ρ , кг/м ³
1.			
2.			
3.			

Определить гидростатическое давление для трех уровней столба жидкости относительно нижнего уровня по уравнению

$$p = \rho \times g \times h, \text{ Па} \quad (36)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – сила тяжести м/с²;

h – высота столба жидкости, м.

Сравнить показания манометра M с расчетным значением давления p и определить погрешность Δ

$$\Delta = \frac{M - p}{M} \times 100, \% \quad (37)$$

Таблица 6 – Результаты расчетов.

№ п/п	$P_{\text{расчет}}$, Па	$P_{\text{ман}}$, Па	Δ , %
1.			
2.			
3.			

После анализа полученных данных делается вывод.

Контрольные вопросы

1. Абсолютное и избыточное давление, вакуум - дать определение.
2. Приборы для измерения давления.. Что называется пьезометрическим напором?
3. Устройство лабораторного стенда?
4. Дайте определение гидростатического давления?

Лабораторная работа № 4 (2 часа)

Исследование относительного покоя жидкости

Цель работы: определение координат свободной поверхности жидкости во вращающемся с постоянной угловой скоростью сосуде.

Приборы и оборудование: кругло-цилиндрический сосуд, заполненный на некоторую высоту водой; электрический приводной двигатель; частотный преобразователь, для изменения частоты вращения электродвигателя; тахометр электронный.

Основные сведения

Случай, когда жидкость находится в сосуде, который равномерно вращается вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью ω (рис. 25).

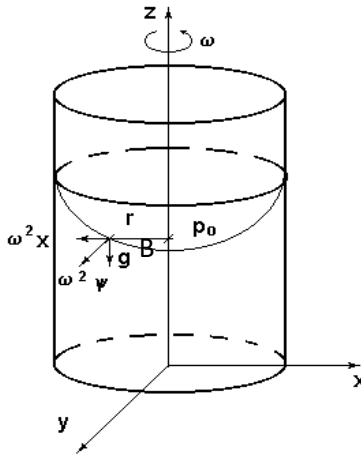


Рисунок 25 – Схема опыта

$$\frac{\omega^2 \cdot r^2}{2} - g \cdot z = const \quad (38)$$

Уравнение (3.1) является уравнением параболоида вращения, который в сечении вертикальными плоскостями дает параболы, а горизонтальными плоскостями – окружности.

Положение любой точки свободной поверхности, например точки В (рисунок 11), определяется координатой

$$z_B = \frac{\omega^2 \cdot r_B^2}{2 \cdot g} \quad (39)$$

где r_B – радиус точки В.

По отношению к дну самая высокая точка свободной поверхности находится на расстоянии

$$z_B = \frac{\omega^2 \cdot r_B^2}{2 \cdot g} \quad (40)$$

Самой низкой точкой параболоида вращения является точка на оси цилиндра (начало координат). Точка соответствует максимальному понижению свободной поверхности по оси резервуара относительно статического уровня H . Ее расстояние от дна резервуара h_0 равно

$$h_0 = H - \frac{\omega^2 \cdot R^2}{4 \cdot g} \quad (41)$$

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 26) состоит из открытого круглого цилиндрического сосуда 1, днище которого закреплено на вертикальном валу 2, расположенном на оси симметрии z сосуда. Сосуд, наполненный примерно на половину водой, приводится во вращение с постоянным числом n оборотов в минуту электродвигателем 3. Определение координат свободной поверхности производится с помощью линейки. Изменение частоты вращения электродвигателя осуществляется с помощью частотного преобразователя 4. Измерение частоты вращения цилиндрического сосуда 1 определяется с помощью электронного тахометра 5.



Рисунок 26 – Схема лабораторной установки для исследования относительно покоя жидкости

1 – цилиндрический сосуд, 2 – вертикальный вал, 3 – электродвигатель, 4 – частотный преобразователь, 5 – тахометр электронный

Порядок выполнения работы

Определить угловую скорость вращения:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (42)$$

Определить расстояние от дна до статического уровня H экспериментально.

Определить экспериментальное понижение уровня свободной поверхности по оси вращения h_0 .

Определить теоретическое понижение уровня свободной поверхности по оси вращения

$$h_0 = H - \frac{\omega^2 \cdot R^2}{4 \cdot g} \quad (43)$$

где R – радиус цилиндра, м;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Определить экспериментальное повышение уровня свободной поверхности по оси вращения H_0 теор

Определить теоретическое повышение уровня свободной поверхности по оси вращения

$$H_0 = H + \frac{\omega^2 \cdot R^2}{4 \cdot g} \quad (44)$$

Экспериментальные данные и результаты обработки заносят в табл.

7.

Таблица 7 - Экспериментальные данные и результаты обработки

№ п/п	Частота вращения	Угловая скорость	Расстояние от дна до статического уровня	Экспериментальное понижение уровня свободной поверхности	Теоретическое понижение уровня свободной поверхности	Относительная погрешность	Экспериментальное повышение уровня свободной поверхности	Теоретическое повышение уровня свободной поверхности	Относительная погрешность
	n , об/мин	ω , с^{-1}	H , м	h_0 , м	$h_{0 \text{ теор}}$, м	Δh , %	H_0 , м	$H_{0 \text{ теор}}$, м	ΔH , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									

Опыты показали, что возможны два режима движения жидкости или газа: ламинарный и турбулентный.

Ламинарное (параллельно-струйное) движение характеризуется упорядоченным перемещением отдельных частиц без перемешивания и без пульсаций скорости и давления. Если в прямой трубе постоянного сечения протекает жидкость при ламинарном режиме движения, то все линии тока направлены параллельно оси трубы, т.е. прямолинейны, а поперечные перемещения жидкости в процессе её течения отсутствуют.

Турбулентное (беспорядочное) движение характеризуется интенсивным перемешиванием частиц жидкости и пульсациями скоростей и давлений. Траектории отдельных частиц при турбулентном движении имеют вид замысловатых кривых, что говорит о том, что при турбулентном движении наряду с основным продольным перемещением жидкости вдоль трубы существуют поперечные перемещения и вращательное движение отдельных объектов жидкости.

Ламинарный режим наблюдается преимущественно при движении вязких жидкостей (нефти, смазочных масел и т.д.), а также при движении воды через тонкие капиллярные трубки.

Движение воды в водопроводных трубах, в разного рода напорных водоводах, в каналах и реках и т.д. при обычно встречающихся на практике скоростях течение почти всегда характеризуется турбулентными режимами.

Режим течения жидкости зависит от её скорости и смена ламинарного течения на турбулентное в данной трубе происходит при определённой скорости течения, что является подтверждением философского закона перехода количества в качество.

На основании анализа результатов опытных исследований Рейнольдс предложил безразмерный коэффициент, называемый числом (критерием) Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu} \quad (45)$$

где V_{cp} – скорость течения жидкости, м/с;

d – диаметр трубы, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

В результате экспериментов Рейнольдс определил, что для круглой трубы критическим числом, при котором происходит смена режимов течения жидкости, является $Re_{кр} = 2320$. Тогда, при $Re < Re_{кр}$ – течение жидкости ламинарное, а при $Re > Re_{кр}$ – турбулентное.

Описание лабораторной установки

Схема экспериментальной установки Рейнольдса показана на рис. 28

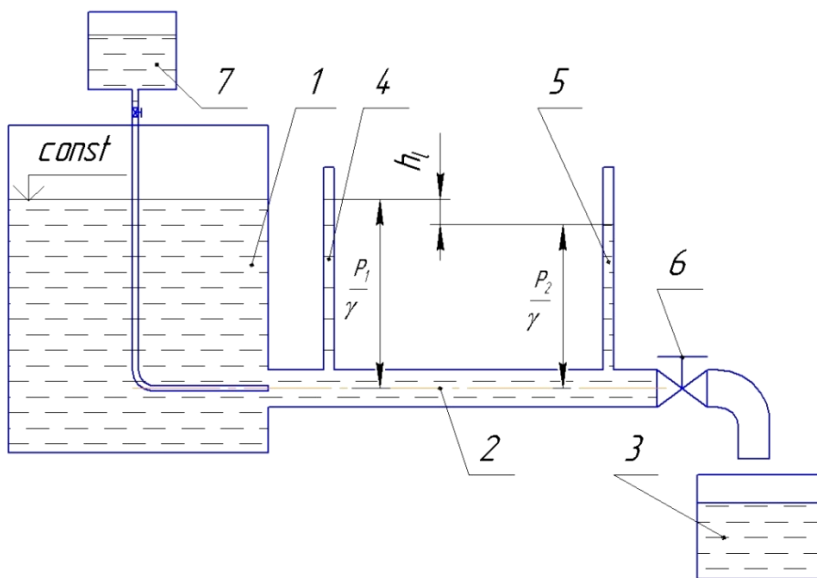


Рисунок 28 – Схема экспериментальной установки: 1 – напорный резервуар; 2 – стеклянная трубка; 3 – мерный бак; 4, 5 – пьезометрические трубки; 6 – регулировочная задвижка; 7 – емкость с краской; P_1 , P_2 – гидростатическое давление в начале и конце трубки; $\frac{P_1}{\gamma}$, $\frac{P_2}{\gamma}$ – пьезометрические напоры.

В стеклянную трубку 2 жидкость поступает из напорного резервуара 1, наполняемого из напорного трубопровода с краном (не указано). Постоянный напор (уровень свободной поверхности жидкости) поддерживается благодаря установки сливной трубы. Изменение скорости течения жидкости в трубе 2 производится краном 6. Мерный бак 3 служит для определения расхода жидкости. Для наглядного наблюдения за режимом течения жидкости в трубе 2 в неё с помощью капиллярной трубки подводится подкрашенная жидкость из емкости 7 с краном.

Порядок выполнения работы

Во время опыта уровень воды в баке 1 поддерживается постоянным с помощью перелива. Опыт начинается с малых скоростей, для этого кран 6 немного открывают и одновременно пускают красящие вещества через капиллярную трубку из емкости 7. В стеклянной трубе должна быть видна окрашенная струйка, которая легко выделяется в движущемся потоке. Следовательно, движущаяся струйка, которая не перемешивается с соседними струйками, т.е. наблюдается струйное движение, называемое ламинарным. Увеличивая степень открытия крана 6 увеличивают скорость движения жидкости до тех пор, пока струйка красящего вещества не начнет теряться в об-

шем потоке жидкости, т. е. происходит переход из ламинарного режима в турбулентный. Дальнейшим открытием крана устанавливают скорость движения, соответствующую установившемуся турбулентному течению, струйка совершенно исчезает, поток окрашивается равномерно. В каждом опыте производят замеры температуры, времени полного или частичного заполнения мерного бака, объема мерного бака. Результаты заносят в табл. 8.

Таблица 8 – Данные проведенных опытов

Наименование характеристик	№ опыта					
	1	2	3	4	5	6
Время опыта, t, с						
Объем воды поступившей в мерный бак, W, см ³						
Температура воды, t, °С						
Показания пьезометра 4, $\frac{P_1}{\gamma}$, мм						
Показания пьезометра 5, $\frac{P_2}{\gamma}$, мм						

Порядок выполнения работы

1/ Величина расхода Q определяется мерным способом при помощи мерного бака 3, см³/с:

$$Q = \frac{W}{t}, \quad (46)$$

где: W – объем жидкости, поступившей в мерный бак за время опыта, см³.

2. Средняя скорость движения жидкости V определяется по формуле, см/с:

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad (47)$$

где: ω - площадь сечения стеклянной трубки, см².

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (48)$$

3. Величину потерь напора h_l , затраченные на преодоление трения по длине трубки, определим по формуле, мм.:

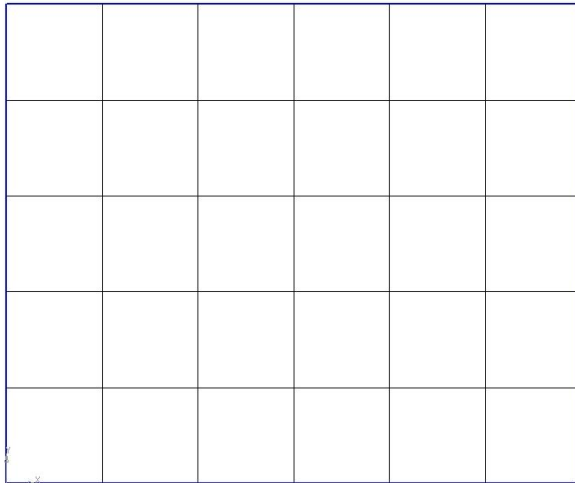
$$h_l = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}, \quad (49)$$

Таблица 9 – Расчетные значения.

Наименование характеристик	№ опыта					
	1	2	3	4	5	6
Расход воды в опыте, см ³ /с						
Площадь живого сечения трубки 2, ω, см ²						
Средняя скорость движения воды, V _{ср} , см/с						
Кинематический коэф. вязкости, ν, см ² /с						
Потери напора, мм						

По значениям величин h_l и $V_{ср}$, строится график $h_l = f(V_{ср})$, и определяется критическая скорость $V_{кр}$.

$h_l, \text{ мм}$



$V, \text{ см/с}$

Рисунок 29 – Сетка для построения графика $h_l = f(V_{ср})$

По значению $V_{кр}$, определенному по графику $h_l = f(V_{ср})$, вычисляется $Re_{кр}$ по формуле:

$$Re = \frac{V_{кр} \cdot d}{\nu} \quad (50)$$

где: ν - коэффициент кинематической вязкости, см²/с.

$V_{кр}$ - критическая скорость (определяется по графику)

Таблица 10 – Значения ν воды в зависимости от температуры.

t, °C	5	10	15	20	25	30
ν , см ² /с	0,015	0,013	0,011	0,010	0,009	0,008

Полученное опытным путем значение $Re_{кр}$ сравниваем с общеизвестным и делаем вывод.

Контрольные вопросы

1. Устройство лабораторного стенда?
2. Что является критерием движения жидкости, как его определить?
3. Особенности течения жидкости при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости.

Лабораторная работа № 6 (4 часа)

Экспериментальная иллюстрация уравнения Бернулли

Цель работы:

- уяснить физическую сущность полного напора и всех его составляющих: геометрического, пьезометрического и скоростного напоров;
- уяснить физическую сущность закона Бернулли;
- построить напорную и пьезометрические линии трубопровода;
- построить графические зависимости измерения мощности потока по длине трубопровода.

Приборы и оборудование: Стенд НТЦ 17.00 «Гидравлика»

Основные сведения

Уравнение Бернулли представляет собой закон сохранения энергии применительно к движущему потоку жидкости. Оно устанавливает связь между удельной потенциальной, удельной кинетической энергией и удельной энергией, затрачиваемой на преодоление сопротивлений движению жидкости, на участке от сечений 1–1 до 2–2. Для установившегося потока вязкой жидкости, движущейся от сечения 1–1 до сечения 2–2, уравнение Бернулли представлено в виде формулы:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \cdot v_{cp1}^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \cdot v_{cp2}^2}{2 \cdot g} + h_w \quad (51)$$

где z_1 и z_2 – высота центров тяжести живых сечений 1–1 и 2–2 по отношению к горизонтальной плоскости сравнения, м;

v_1 и v_2 – средняя скорость движения жидкости в живых сечениях 1–1 и 2–2, м;

p_1 и p_2 – давление в центрах тяжести сечений 1–1 и 2–2, Па;

α_1 и α_2 – коэффициент Кориолиса (учитывает неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока реальной жидкости); $\alpha = 2$ – для ламинарного режима движения жидкости; $\alpha = 1$ – для турбулентного режима движения;

h_w – потери напора на преодоление сопротивлений движению жидкости, м.

Уравнение Бернулли имеет энергетический и геометрический смысл. Энергетический смысл заключается в том, что каждый член уравнения представляет собой удельную энергию – энергию, отнесенную к единице веса жидкости, а геометрический смысл заключается в том, что каждый член представляет собой высоту: z – удельная потенциальная энергия положения или геометрическая высота; $p/\rho g$ – удельная потенциальная энергия давления или пьезометрическая высота; $V^2/2g$ – удельная кинетическая энергия или скоростная высота (скоростной напор). Сумма геометрической высоты z и пьезометрической высоты $p/\rho g$ называется пьезометрическим напором (удельной потенциальной энергией). Линия, изображающая изменение удельной потенциальной энергии по длине потока относительно условной горизонтальной плоскости (плоскости сравнения), называется пьезометрической линией (линия Р-Р рис. 29). Линия, изображающая изменение полной энергии по длине потока относительно условной горизонтальной плоскости (плоскости сравнения), называется напорной линией (линия Е-Е рис. 29). В зависимости от изменения живого сечения вдоль потока, происходит перераспределение удельной потенциальной $z+p/\rho g$ и удельной кинетической $V^2/2g$ энергии. При уменьшении площади живого сечения потока увеличивается средняя скорость потока v и, следовательно, возрастает удельная кинетическая энергия $V^2/2g$, а потенциальная энергия $z+p/\rho g$, соответственно, уменьшается. Гидродинамический напор (полная удельная энергия) по направлению движения потока реальной жидкости непрерывно уменьшается из-за наличия сил внутреннего трения и трения жидкости о стенки трубопровода, в то время как пьезометрический напор не всегда уменьшается. Пьезометрическая высота $p/\rho g$ измеряется с помощью прозрачных трубок (пьезометров), герметически присоединенных к отверстию в стенке трубопровода. Для измерения полной энергии используются гидродинамические трубки (ГДТ или трубки Пито) с нижним концом, погруженным на ось трубопровода и отогнутым против направления движения жидкости. Уровень воды в ГДТ поднимается выше, чем уровень в пьезометрах на величину скоростной высоты $V^2/2g$.

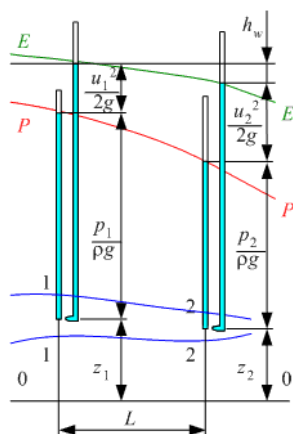


Рисунок 29 – Графическая интерпретация уравнения Д. Бернулли

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на гидравлическом стенде НТЦ 17.00 «Гидравлика». Схема гидравлическая принципиальная стенда приведена на рис. 30. В состав стенда входят гидробак Б, шестеренный насос Н, фильтр Ф, предохранительный клапан КП, регулятор расхода РР, два гидрораспределителя Р1 и Р2, пружинный аккумулятор А, два гидродросселя ДР1 и ДР2, трубопроводы (в том числе исследуемые участки трубопроводов а б с и участок д с установленным дросселем ДР2). Привод насоса осуществляется от электродвигателя. Информационно-измерительная система стенда включает 6 манометров (МН1 – МН6, манометр МН5 – электроконтактный с двумя управляемыми контактами), расходомер скоростного типа РА, термометр Т и электронный секундомер. Управление гидрораспределителями осуществляется тумблерами Р1 и Р2. Возможны два режима работы электронного секундомера – ручной и автоматический (указанные режимы работы устанавливаются тумблером на верхней панели). При установке тумблера в положение «РУЧН» секундомер используется для определения времени прохождения через расходомер РА заданного объема жидкости (с тем, чтобы в дальнейшем определять расход жидкости в трубопроводе). Питание секундомера включается тумблером «Вкл»; начало отсчета времени – тумблером «Счет»; сброс показаний электронного табло – кнопкой «Сброс». При нажатии кнопки «Сброс» секундомер не должен производить отсчет времени, т. е. тумблер «Счет» необходимо переключить в нижнее положение. При установке тумблера установки режима в положение «АВТ» секундомер используется для подсчета времени заполнения и опорожнения рабочей полости пружинного аккумулятора А (при этом должно быть включено питание секундомера и счет, то есть тумблеры постоянно установлены в положение «Вкл» и «Счет»). Включением и выключением секундомера управляет электроконтактный ма-

номер МН5. После завершения процесса заполнения или опорожнения рабочей полости аккумулятора А фиксируется время процесса, а затем, нажав кнопку «Сброс», можно сбросить показания табло. Номинальное давление в системе 1 МПа (допускается до 1,1 МПа). Давление устанавливается с помощью регулировочного винта, установленного на предохранительном клапане. Винт должен быть надежно зафиксирован с помощью контргайки. Заправочная емкость гидробака – 70 дм³ (л). Рекомендуемые рабочие жидкости: минеральные масла МГЕ46В, МГ-30у, М-8В.

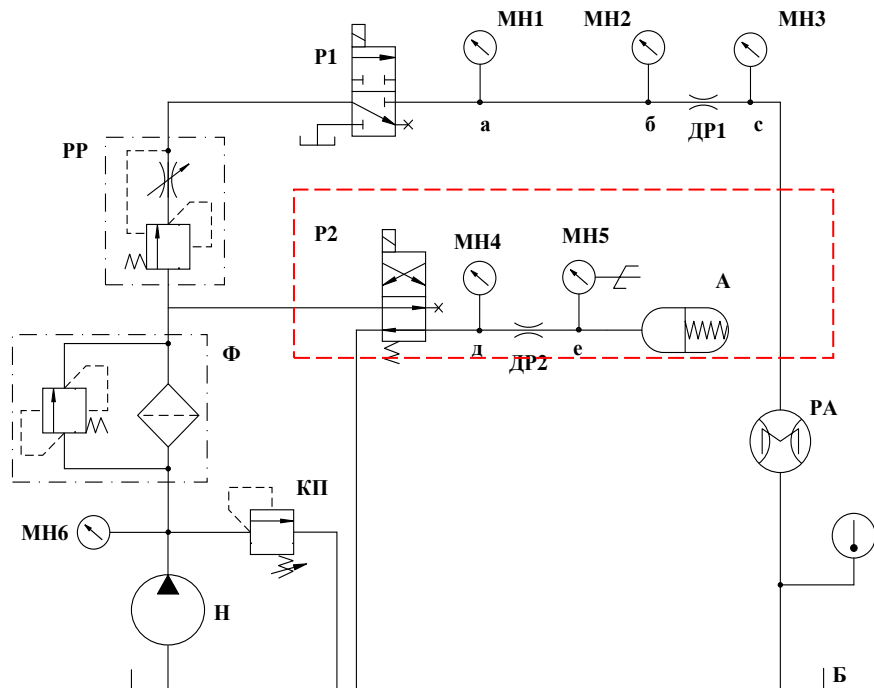


Рисунок 30 – Гидравлическая схема лабораторного стенда.

Объектом испытаний в данной работе является стальной трубопровод **abc** (рис. 31) постоянного диаметра ($d = 8$ мм), трубопровод содержит дроссель (диаметр $d_{др} = 3$ мм). Все размеры на схеме приведены в мм.

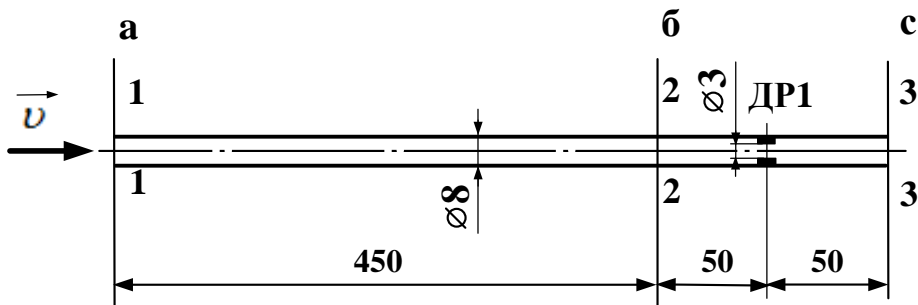


Рисунок 31 – Схема исследуемого трубопровода

Нумерация сечений трубопроводов соответствует номерам манометров. Трубопровод расположен горизонтально, имеет постоянный диаметр и содержит одно местное сопротивление – гидродроссель ДР1.

Порядок выполнения работы

До включения стенда необходимо убедиться в том, что регулятор расхода РР настроен на минимальный расход (указатель в полож. «1»), а тумблеры управления гидрораспределителями Р1 и Р2 находятся в положении «Выкл.».

Далее необходимо при различных расходах провести два опыта. Первый опыт провести при минимальном расходе (при этом показание манометра МН3 должно отличаться от нуля). Второй опыт провести при максимальном расходе (при этом маховик управления РР необходимо повернуть до ограничения по часовой стрелке в положение «4»).

В каждом опыте необходимо измерять:

- давления $p_1 - p_3$ по манометрам МН1–МН3;
 - время t прохождения через расходомер объема жидкости $W_{ж}$, с. Объемом $W_{ж}$ необходимо задаться, приняв его, например, равным в обоих опытах $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (5 л);
 - температуру рабочей жидкости T , °С (по термометру).
- Результаты измерений занести в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты исследований

Номер опыта			
1	1	i – номер сечения трубопровода	
	2	p – величина давления, МПа	
	3	$W_{ж}$ – объем жидкости, проходящей через расходомер, м ³	$5 \cdot 10^{-3}$
2	1	t – время прохождения объема $W_{ж}$ через расходомер, с	
	2	T – температура жидкости, °С	
	3	Q – расход жидкости, м ³ /с	
		ν – средняя скорость, м/с	
		ν – кинематическая вязкость, м ² /с	
		Re – число Рейнольдса	
		α – коэффициент Кориолиса	
		z_i – геометрический напор, м	
		$p_i / (\rho \cdot g)$ – пьезометрический напор, м	
		$\alpha \cdot v^2 / (2 \cdot g)$ – скоростной напор, м	
		$z_i + p_i / (\rho \cdot g)$ – удельная потенциальная энергия потока, м	
		H_I – полный напор, м	
		N_i – мощность потока, Вт	

Обработка результатов

1. Расход жидкости в трубопроводе равен:

$$Q = \frac{W_{ж}}{t}, \quad (52)$$

2. Средняя скорость потока:

$$\nu_{cp} = \frac{Q}{S_{сп}}, \quad (53)$$

где $S_{тр}$ – площадь сечения трубопровода, м² ($d = 8$ мм).

5.3 Кинематическая вязкость ν определяется с учетом температуры по графику $\nu = f(T)$ (должен быть в лаборатории для применяемого в гидростанции масла).

4. Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v_{cp} \cdot d}{\nu}, \quad (54)$$

5. Коэффициент Кориолиса $\alpha = 2$ при $\text{Re} < 2320$, и $\alpha = 1$ при $\text{Re} > 2320$.

Геометрические напоры z_i равны значениям вертикальных координат (в выбранной системе координат). В связи с тем, что исследуемый трубопровод расположен горизонтально, для всех сечений $z_i = \text{const}$. Место расположения плоскости сравнения (а, следовательно, и величину z_i) необходимо согласовать с преподавателем. Если ось трубопровода совместить с плоскостью сравнения, то $z_i = 0$.

6. Полный напор H_i вычисляются по формуле:

$$H_i = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{\alpha V_i^2}{2g} \quad (55)$$

7. Мощность потока N_i вычисляются по формуле:

$$N_i = H_i Q_{Gi} = H_i \gamma Q_i, \quad (56)$$

Результаты вычислений занести в таблицу 11 и построить для обоих опытов напорную и пьезометрические линии трубопровода

$$H = f_1(l_{\text{тр}}), \quad z + p/(\rho \cdot g) = f_2(l_{\text{тр}}), \quad \text{а также зависимость}$$

$$N_i = f_3(l_{\text{тр}}).$$

При построении графиков необходимо учитывать, что начало трубопровода находится в сечении 1-1, а конец – в сечении 3-3.

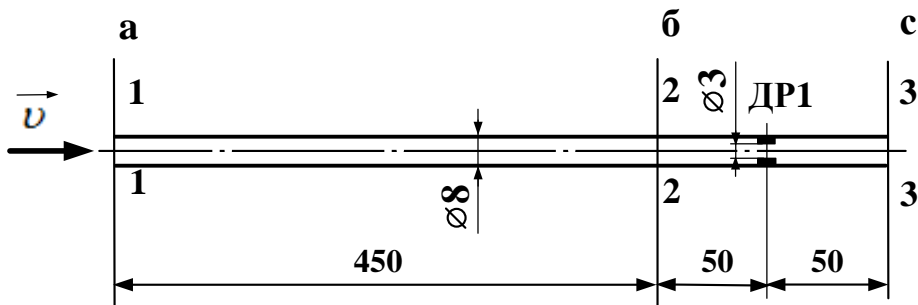


Рисунок 32 – Сетка для построения графиков $H=f_1(l_{тр}), z+p/(\rho \cdot g)=f_2(l_{тр}), N_i=f_3(l_{тр})$.

Контрольные вопросы

1. Устройство лабораторного стенда.
2. Физический смысл геометрического, пьезометрического, скоростного и полного напоров, методика их экспериментального определения.
3. Связь полного напора и мощности.
4. Виды сопротивлений при движении жидкости и их определение.

Лабораторная работа № 7 (4 часа) Измерение расхода жидкости

Цель работы: 1. Измерить расход жидкости объемным способом и определить коэффициент расхода водослива.

Приборы и оборудование: Счетчик-расходомер турбинного типа, центробежный насос, мерная емкость.

Основные сведения

Под расходом в механике жидкости и газа понимается количество вещества, проходящее через живое сечение потока в единицу времени. Если это количество измеряется в единицах массы, то расход называется массовым, в случае использования для измерения количества единиц объема – объемным, если же мерой количества вещества являются единицы силы (обычно это силы тяжести), то расход называется весовым. Приборы, измеряющие расход вещества, называются расходомерами.

Большое разнообразие и сложность требований, предъявляемых к расходомерам и счетчикам, явилось причиной разработки и создания значительного числа разновидностей приборов.

Расходомер – прибор или устройство из нескольких частей, измеряющий расход вещества (жидкости, газа или пара).

Условно расходомеры и счетчики можно подразделить на следующие основные группы:

А. Приборы, основанные на гидродинамических методах:

- переменного перепада давления;
- переменного уровня;
- обтекания;
- вихревые;
- парциальные.

Б. Приборы с непрерывно движущимся телом:

- тахометрические;
- силовые (в том числе вибрационные).

В. Приборы, основанные на различных физических явлениях:

- тепловые;
- электромагнитные;
- акустические;
- оптические;
- ионизационные.

Количество вещества можно измерять либо в единицах массы килограмм (кг), тонна (т), либо в единицах объема кубический метр (м³), литр (л). В соответствии с выбранными единицами может производиться измерение либо массового расхода Q_m (единицы кг/с, кг/ч, т/ч и т. д.), либо объемного расхода Q_o (единицы м³/с, л/с, м³/ч и т. д.). Единицы массы дают более полные сведения о количестве или расходе вещества, чем единицы объема, так как объем вещества, особенно газов, зависит от давления и температуры. При измерении объемных расходов газов для получения сопоставимых значений результаты измерения приводят к определенным (так называемым нормальным) условиям. Такими нормальными условиями принято считать температуру $t_n = 20^\circ\text{C}$, давление $p_n = 101325 \text{ Па}$ (760 мм ртутного столба) и относительную влажность $\varphi=0$. В этом случае объемный расход обозначается Q_n и выражается в объемных единицах.

$$Q = k \sqrt{\Delta P} \quad (56)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров сужающего устройства, плотности и вязкости вещества;

ΔP – перепад давлений.

Классификация расходомеров переменного перепада давления

Расходомером переменного перепада давления называются измерительный комплекс, основанный на зависимости от расхода перепада давления, создаваемого преобразователем расхода, установленным в трубопроводе, или элементом последнего.

Расходомеры с сужающими устройствами СУ основаны на измерении перепада давления, возникающего в результате преобразования в СУ части потенциальной энергии в кинетическую. Рассмотрим разновидности СУ.

Стандартные диафрагмы представляют собой тонкий диск с центральным круглым отверстием диаметром d , имеющим острую входную кромку. Диа-

фрагма установлена строго concentрично оси трубопровода, имеющего диаметр D . Обозначим через $A-A$ рисунок 33 сечение, от которого начинается сужение потока, а штриховой линией – границы потока, обусловленного проходом через отверстие диафрагмы.

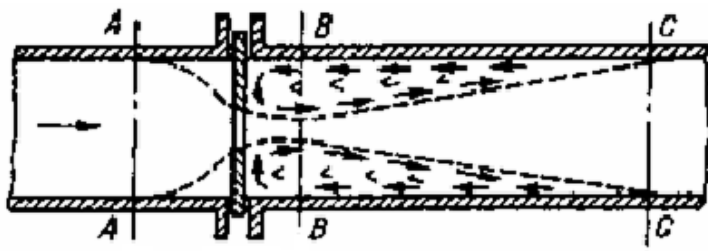


Рисунок 33 - Прохождения потока через диафрагму

По инерции небольшого сужения поток достигает в сечении $B-B$. Затем поток начинает расширяться и вновь достигает стенок трубопровода в сечении $C-C$.

Рассматриваемый принцип измерения заключается в том, что при протекании потока через отверстие сужающего устройства повышается скорость потока по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии и соответственно статического давления. Расход может быть определен по перепаду давления Δp , измеренному дифманометром в соответствии с градуировочной характеристикой $\Delta p=f(Q)$. Использование рассматриваемого метода измерения требует выполнения определенных условий: характер движения потока до и после сужающего устройства должен быть турбулентным и стационарным; поток должен полностью заполнять все сечение трубопровода; фазовое состояние потока не должно изменяться при его течении через сужающее устройство; во внутренней полости трубопровода до и после сужающего устройства не образуются осадки и другие виды загрязнений; на поверхностях сужающего устройства не образуются отложения, изменяющие его геометрию; пар является перегретым, при этом для него справедливы все положения, касающиеся измерения расхода газа.

На рисунке 34 изображены разновидности сопла и диафрагм. Стандартные диафрагмы - а и б; стандартные сопла - в; сегментная диафрагма - г; эксцентричная диафрагма - д; кольцевая диафрагма - е.

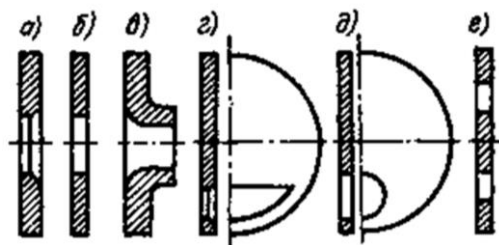


Рисунок 34 - Разновидности диафрагм

Сужающие устройства для малых чисел Рейнольдса к этим устройствам относятся: двойная диафрагма, диафрагма с входным конусом, диафрагма с двойным конусом, сопло четверть круга, сопло полу круга, комбинированное сопло и цилиндрическое сопло.

Они отличаются друг от друга не только устройствами, но и областями чисел Re , в пределах которых у них сохраняются постоянство коэффициента α .

Диафрагма рисунок 35(а) представляет собой тонкий диск с круглым отверстием, ось которого располагается по оси трубы. Передняя (входная) часть отверстия имеет цилиндрическую форму, а затем переходит в коническое расширение. Передняя кромка отверстия должна быть прямоугольной (острой) без закруглений и заусениц. Стандартные диафрагмы устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм.

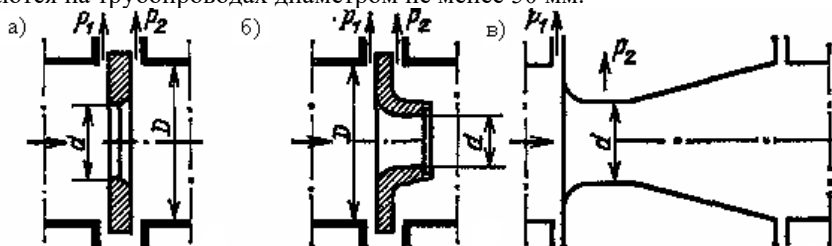


Рисунок 35 - Стандартные сужающие устройства:
а — диафрагма; б — сопло; в — сопло Вентури

Сопло рисунок 1.36(б) имеет спрофилированную входную часть, которая затем переходит в цилиндрический участок диаметром d (его значение входит в уравнения расхода). Торцевая часть сопла имеет цилиндрическую выточку диаметром, большим d , для предохранения выходной кромки цилиндрической части сопла от повреждения.

Сопло Вентури контур показан на рисунке 35 (в) имеет входную часть с профилем сопла, переходящую в цилиндрическую часть, и выходной конус (может быть длинным или укороченным). Минимальный диаметр трубопровода для стандартных сопел Вентури составляет 65 мм. На рисунке 35 сим-

волами p_1 и p_2 отмечены точки отбора давлений на дифманометр.

Между расходом и перепадом давления в сужающем устройстве существует определенная квадратичная зависимость, что позволяет дифманометры, измеряющие перепад давления, градуировать в единицах расхода. Такие дифманометры называются дифманометрами-расходомерами. Для получения равномерной шкалы расходомера в кинематическую или электронную схему дифманометров или вторичных приборов включаются различные типы устройств, извлекающих квадратный корень. Наличие таких устройств является одним из недостатков метода измерения расхода по перепаду давления.

Расходомеры с гидравлическим сопротивлением

Расходомеры основаны на измерении перепада давления, создаваемого этим сопротивлением. Режим потока в нем стремятся создать ламинарным, с тем чтобы перепад давления был пропорциональным расходу. Применяются редко, преимущественно для измерения малых расходов. В качестве преобразователя могут служить капиллярная трубка (реометр) или пакет таких трубок, и другой тип преобразователя для больших расходов с шариковой набивкой.

Диаметр капиллярной трубки менее 0,25 мм не следует из – за опасности засорения. Поэтому для получения достаточного перепада давления при малом значении расхода применяют различные способы.

Длину капиллярной трубки увеличивают и располагают ее в виде спирали для достижения компактности преобразователей.

Недостаток спиральных капилляров – отсутствие линейной зависимости между расходом и перепадом давления вследствие действия центробежной силы, резко увеличивающей перепад давления по сравнению с прямыми капилляром.

Другой путь состоит в применении прямого капилляра достаточно диаметра, но со стержнем внутри трубки. При этом измеряемое вещество движется по кольцевой щели. Здесь можно обеспечить линейную зависимость между расходом и перепадом давления путем расположения отверстий для отбора давлений в пределах прямолинейного участка трубки. Такие преобразователи нашли распространения в химической промышленности.

Третий путь – применения капиллярных преобразователей винтового типа. Их основа – прецизионная винтовая пара с неполной ленточной, трапецидальной или конусной резьбой. Достоинство – возможность легкого перехода на разные пределы измерения путем регулирования длине винтовой части, находящейся в зацепление.

Расходомеры переменного уровня.

Принцип действия расходомеров переменного уровня основан на зависимости высоты уровня жидкости в сосуде от расхода непрерывно поступающей и вытекающей из сосуда жидкости. Вытекание жидкости из сосуда происходит через отверстия в дне или боковой стенке. Сосуды для приема жидкости выполняют цилиндрическими или прямоугольными.

В расходомерах с полностью затопленными отверстиями истечения по-

следние имеют круглую форму и располагаются либо в дне, либо в боковой стенке. В расходомерах с частично заполненными отверстиями истечения последние выполнены в виде щели в боковой стенке. Расходомеры переменного уровня могут быть использованы для измерения расхода газонасыщенных нефтей, сточных вод и загрязненных жидкостей, в том числе содержащих взвеси.

В расходомере переменного уровня с затопленным отверстием рисунок 36(а) измеряемый поток поступает в сосуд 3 через патрубок 4.

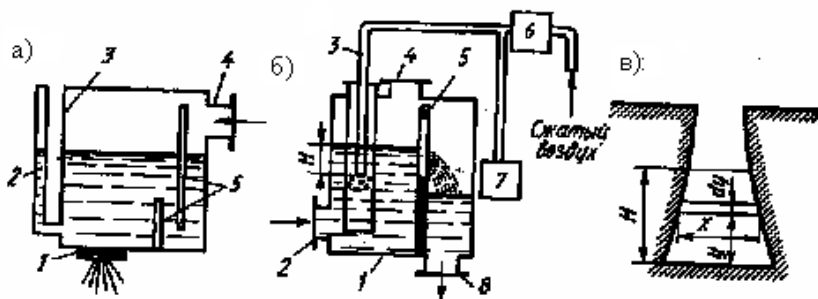


Рисунок 36 - Схемы расходомеров переменного уровня

На дне сосуда в качестве отверстия истечения обычно устанавливается нормальная диафрагма 1. для предохранения диафрагмы от загрязнения и успокоения потока жидкости внутри сосуда установлены перегородки 5. уровень в сосуде определяется по водомерному стеклу 2.

Расходомеры с щелевым отверстием истечения рисунок 36 (б) состоит из сосуда 1, в который через патрубок 2 поступает измеряемая жидкость. Внутри сосуда размещена перегородка, снабженная щелью 5, через которую происходит истечение жидкости из левой части сосуда в правую с выходным патрубком 8. для измерения уровня H над нижней кромкой щели в защитном чехле установлена пьезометрическая трубка 3, через которую непрерывно продувается воздух, предварительно прошедший систему подготовки газа 6. давление воздуха в трубке 3, измеряемое дифманометром 7, служит мерой уровня H . Зависимость объемного расхода Q жидкости от уровня H определяется формой отверстия истечения 3б в.

Расходомеры обтекания

Расходомерами обтекания называются приборы, чувствительный элемент которых воспринимает динамическое давление потока и перемещается под его воздействием, причем величина перемещения зависит от расхода. Расходомеры обтекания состоят из следующих трех групп.

1. Расходомеры постоянного перепада давления, у которых обтекаемое тело перемещается вертикально, а противодействующая сила создается весом тела.

2. Расходомеры с изменяющимся перепадом давления, в которых в

большинстве случаев имеется противодействующая пружина и помимо вертикальной может быть и другая траектория перемещения обтекаемого тела.

3. Расходомеры с поворотной лопастью, противодействующая сила в них создается не только весом тала, но во многих случаях еще и пружиной. Кроме того, имеются компенсационные расходомеры с поворотной лопастью, в которых противодействующая сила создается посторонним источником энергии.

Расходомеры постоянного перепада давления

Расходомеры постоянного перепада давления подразделяются на: ротаметры, поплавковые и поршневые (или точнее золотниковые). Эти приборы (особенно ротаметры) наиболее широко применяются по сравнению с другими расходомерами обтекания.

Ротаметры используются в промышленных и лабораторных условиях для измерения небольших объемных расходов жидкостей (верхние пределы измерения ротаметров по воде находятся в пределах от 0,04 до 16 м³/ч) или газов (верхние пределы измерения ротаметров по воздуху находятся в пределах от 0,063 до 40 м³/ч) в вертикальных трубопроводах диаметром 4—100 мм.

Основные элементы ротаметра – коническая трубка 1 и поплавок 2 – образуют его проточную часть рисунок 37.

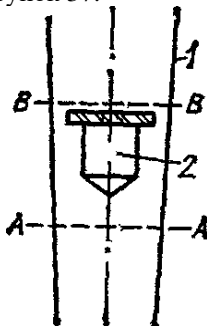


Рисунок 37 - Схема ротаметра

Поплавки могут иметь различную форму. Одной из форм является цилиндрическая с нижней конической частью и верхним бортиком с вырезанными на нем косыми канавками. Контролируемая среда при протекании через эти канавки обеспечивает вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки и устраняется его трение о стенки.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой зазор f_k , при прохождении через который жидкость сужается и, таким образом, возникает разность между давлением p_1 в сечении АА до начала сужения и давлением p_2 в самом узком сечении ВВ кольцевой струи. С подъемом поплавка площадь f_k увеличивается, что в случае неизменного расхода приведет к уменьшению разности $p_1 - p_2$. Принцип действия ротаметра основан на уравновешивании при любом расходе силы тяжести поплавка силами, действующими

щами на него со стороны жидкости. При этом вертикальное положение поплавка будет однозначно связано с расходом.

Положение поплавка зависит не только от расхода, но и от плотности контролируемой среды, т. е. градуировка ротаметра должна производиться с учетом ее. Из-за большого разнообразия контролируемых сред ротаметры подразделяются на две группы: для жидкостей, которые градуируются на воде, и для газов, которые градуируются на воздухе.

Переградуировка ротаметра может быть осуществлена изменением p_n , например путем изготовления поплавка из другого материала или пустотелым.

Обычно в ротаметрах используются стеклянные конические трубки, на наружной поверхности которых нанесена шкала. Указателем служит верхняя горизонтальная плоскость поплавка. Ротаметры со стеклянной конусной трубкой применяются для измерения расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под давлением не более 3,6 МПа (6 кгс/см²).

Для измерения расхода сред под избыточным давлением до 6,4 МПа (64 кгс/см²) используются ротаметры с металлической конической трубкой. Обычно такие ротаметры снабжаются дифференциально - трансформаторными или пневматическими преобразователями для дистанционной передачи показаний. Класс ротаметров с дифференциально - трансформаторным преобразователем в комплекте с вторичным прибором равен 2,5.

Недостатками ротаметров являются необходимость установки только на вертикальных участках трубопроводов, трудности дистанционной передачи показаний и записи, непригодность для измерения расхода сред с высокими давлением и температурой.

Расходомеры с поворотной лопастью

В трубопроводе подвешивается лопасть, на которую воздействует гидродинамическое давление потока жидкости или газа. Расход определяется по углу поворота лопасти или по величине противодействующей силы, уравновешивающей давление потока в компенсационных приборах. В последнем случае угол поворота лопасти может ничтожно мал.

По виду противодействующей силы расходомеры с поворотной лопастью подразделяются на расходомеры с грузовым и с пружинным уравновешиванием, а также на компенсационные с пневматическими или электрическим уравновешиванием.

Достоинство их: большой диапазон измерения, доходящий до 15 – 20, и возможность двустороннего действия. Кроме того, они позволяют сравнительно просто осуществить измерения больших расходов жидкости и газов, а также веществ, имеющих высокую температуру или обладающих агрессивными свойствами. Их динамические характеристики достаточно хорошие.

Основной элемент расходомера – поворотная лопасть – даже при постоянном расходе непрерывно вибрирует вследствие срыва вихрей с ее тыльной стороны. Небольшая вибрация не мешает работе. Она в ряде случаев даже

может быть полезна, так как препятствует оседанию грязи и других механических примесей на лопасти.

Расходомеры с поворотной лопастью, имеющей грузовое уравнивание устанавливаются только в горизонтальном трубопроводе. Простота устройства расходомеров с поворотной лопастью позволяет создавать их даже самими потребителями и применять в различных практических случаях, в частности для измерения расхода сточных вод, содержащих крупные механические примеси.

Расходомеры с поворотной лопастью, имеющей пружинное уравнивание могут устанавливаться как на горизонтальных, так и на вертикальных трубопроводах. У них поворотная лопасть либо укреплена на конусе торсионной трубки, создающей при своей закрутке противодействующий момент $M_{пр}$, либо связана с винтовой, спиральной или другого рода противодействующей пружиной.

На рисунке 38 показана схема прибора ДР – 21.

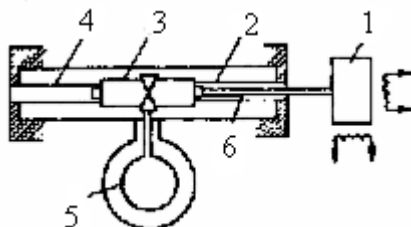


Рисунок 38 - Схема расходомеров с поворотной лопастью – пружинным противодействием

Поворотная лопасть в виде перфорированного диска 5, имеющего диаметр, составляющий 0,75 от диаметра трубопровода, укреплена на оси 3, жестко связанной с концами двух торсионов 2 и 4, которые предварительно закручены в противоположные стороны на некоторый угол для температурной и гистерезисной компенсации. Центральный стержень 6 вызывает при закрутке торсиона 2 поворот ротора 1 дистанционной передачи показаний. Для поворотных лопастей, связанных с торсионами, характерен очень малый угол поворота, обычно находящийся в пределах 1 градуса.

Особую группу приборов представляют расходомеры, у которых верхний конец лопасти жестко закреплен. Такая лопасть под действием динамического давления потока не поворачивается, а работает на изгиб. При этом противодействующий момент образуется силами упругости лопасти.

Вихревые расходомеры

Вихревыми называют расходомеры, основанные на зависимости от расхода частоты колебаний давления, возникающих в потоке в процессе вихреобразования или колебания струи. Они разделяются на три группы, существенно отличные друг от друга.

1. расходомеры, имеющие в первичном преобразователе неподвижное тело, при обтекании которого с обеих его сторон попеременно возникают

срывающиеся вихри, создающие пульсации давления.

2. Расходомеры, в первичном преобразователе которых поток закручивается, попадая затем в расширенную часть трубы, прецессирует, создавая при этом пульсации давления.

3. Расходомеры, в первичном преобразователе которых струя, вытекающая из отверстия, совершает автоколебаний, создавая при этом пульсации давления.

Работу вихревых расходомеров могут нарушать акустические и вибрационные помехи, создаваемым различными источниками: насосами и компрессорами, местными сопротивлениями, завихрителями, вибрирующими трубами. Если частота вредных пульсаций отличается от частоты измерительного сигнала, то ее влияния можно устранить с помощью электрических фильтров. Сложнее их устранить, если эти частоты совпадают. Иногда применяют струевыпрямитель на выходном патрубке преобразователя расхода.

Рассмотрим принцип действия на примере многопараметрического датчика Метран – 335. Измерение расхода газа реализовано на вихревом принципе действия. На входе в проточную часть датчика установлено тело обтекания рисунок 39.

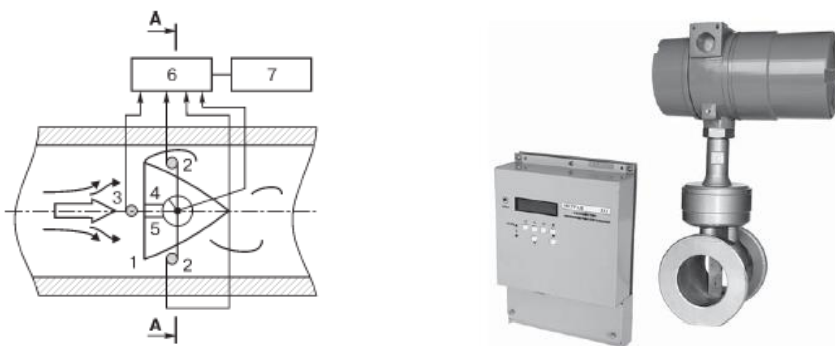


Рисунок 39 - Конструктивное представление датчика Метран – 335

За телом обтекания по направлению потока газа, симметрично расположены два пьезоэлектрических преобразователя пульсаций давления 2. При протекания потока газа через проточную часть датчика за телом обтекания образуется вихревая дорожка, частота следования вихрей в которой с высокой точностью пропорционально скорости потока, а, следовательно и расходу. В свою очередь, вихреобразования приводит к появлению за телом обтекания пульсаций давления среды.

Пульсации давления воспринимаются пьезоэлектрическими преобразователями, сигналы с которых в форме электрических колебаний поступают на плату цифровой обработки, где происходит вычисления объемного расхода и объема газа.

Преобразователь избыточного давления 3 тензорезистивного принципа действия размещен перед телом обтекания вблизи места его крепления.

Термопреобразователь сопротивления платиновый 4 размещен внутри тела обтекания. Для обеспечения непосредственного контакта со средой в теле обтекания выполнены отверстия 5. электрический сигнал термопреобразователя подвергается цифровой обработке.

Плата цифровой обработки 6, содержащая два микропроцессора, производит обработку сигналов преобразователей пульсации давления. Выходные сигналы передаются на вычислитель 7.

Тахометрические расходомеры

Тахометрическими называются расходомеры и счетчики, имеющие подвижной, обычно вращающийся элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу. Они подразделяются на турбинные, крыльчатые, шариковые, роторно-шаровые и камерные. Иногда крыльчатки называют турбинками, различаются они конструкцией лопаточного аппарата и подачей потока.

Измеряя скорость движения подвижного элемента, получаем расходомер, а измеряя общее число оборотов (или ходов) его — счетчик количества (объем или массу) прошедшего вещества. Счетчики воды и газа давно получили широкое распространение, так как для этого надо лишь соединить вал турбинки или другого преобразователя расхода через зубчатый редуктор со счетным механизмом. Для создания же тахометрического расходомера скорость движения элемента надо предварительно преобразовать в сигнал, пропорциональный расходу и удобный для измерения. В этом случае необходим двухступенчатый преобразователь расхода. Его первая ступень — турбинка, шарик или другой элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу, а вторая ступень — тахометрический преобразователь, вырабатывающий измерительный сигнал, обычно частоту электрических импульсов, пропорциональную скорости движения тела. Здесь измерительным прибором будет электрический частотомер: цифровой или аналоговый. Если его дополнить счетчиком электрических импульсов, то получим наряду с измерением расхода также и измерение количества прошедшего вещества. Тахометрические расходомеры появились значительно позже упомянутых ранее счетчиков количества жидкости и газа и не получили еще столь широкого распространения. Их существенные достоинства — быстроедействие, высокая точность и большой диапазон измерения. Так, если погрешность турбинных счетчиков воды (ось которых через редуктор связана со счетным механизмом) равна плюс минус 2 процента, то у измерителей количества, имеющих тахометрический преобразователь, эта погрешность снижается до плюс минус 0,5 процента. Причина в том, что этот преобразователь почти не нагружает ось турбинки в отличие от редуктора и счетного механизма. Погрешность же турбинного расходомера от 0,5 до 1,5 процента в зависимости от точности примененного частотомера.

Крыльчатые и турбинные тахометрические расходомеры и счетчики ко-

личества могут изготавливаться для труб диаметром от 4 до 750 мм, для давлений до 250 МПа и температур от минус 240 до плюс 700 °С. У нас турбинные приборы применяют преимущественно для измерения расхода и количества воды, различных нефтепродуктов и других жидкостей. На ряде российских заводов начато их производство и для измерения расхода газа. Основной недостаток турбинных расходомеров — изнашивание опор, и поэтому они непригодны для веществ, содержащих механические примеси. Кроме того, с увеличением вязкости вещества диапазон линейной характеристики уменьшается, что исключает их применение для очень вязких веществ. Но смазывающая способность измеряемого вещества желательна для турбинных расходомеров. Это делает их более пригодными для жидкостей, чем для газов.

Иногда для измерения расхода в трубах большого диаметра применяют маленькие крыльчатки и турбинки, занимающие небольшую часть площади сечения трубы. С помощью жесткой штанги они вводятся в центр или в другую точку сечения потока. Погрешность измерения расхода ориентировочно плюс минус 5 процента.

Шариковые расходомеры появились позднее турбинных. Они служат для измерения расхода жидкостей, главным образом воды, в трубах диаметром до 150-200 мм. Их важное достоинство — возможность работы на загрязненных средах.

Роторно-шаровые расходомеры появились сравнительно недавно и пока не получили широкого применения.

Камерные приборы как счетчики жидкости и газа наряду с турбинными применяют очень давно. Ранее их называли объемными приборами. Они отличаются большим разнообразием подвижных элементов, дающих наименование разновидностям этих приборов: роторные, поршневые, дисковые, с овальными шестернями, лопастные, винтовые и т. д. По сравнению с турбинными и шариковыми счетчиками количества они могут обеспечить большую точность и больший диапазон измерения. Так, несмотря на связь вала подвижного элемента с редуктором и счетным механизмом, погрешность у некоторых из них составляет всего плюс минус (0,2÷0,5) процента. Кроме того, камерные счетчики пригодны для измерения количества жидкости любой вязкости, в том числе и очень большой. Но они чувствительны к загрязнению и механическим примесям.

При необходимости иметь результаты измерения крыльчатками, турбинными, шариковыми и камерными приборами в единицах массы их дополняют устройствами, корректирующими показания в зависимости от плотности измеряемого вещества или только от температуры — для жидкостей.

Крыльчатые и турбинные тахометрические расходомеры

Аксиальные турбинки имеют винтовые лопасти с переменным по высоте углом подъема винтовой линии. Попытка применения плоских лопастей при измерении расхода вязких сред привела к ухудшению линейной характеристики. Но при измерении расхода газа и жидкостей с малой вязкостью их применение целесообразно. Схема аксиальной турбинки для труб небольшого

диаметра показана на рисунке 40(а).

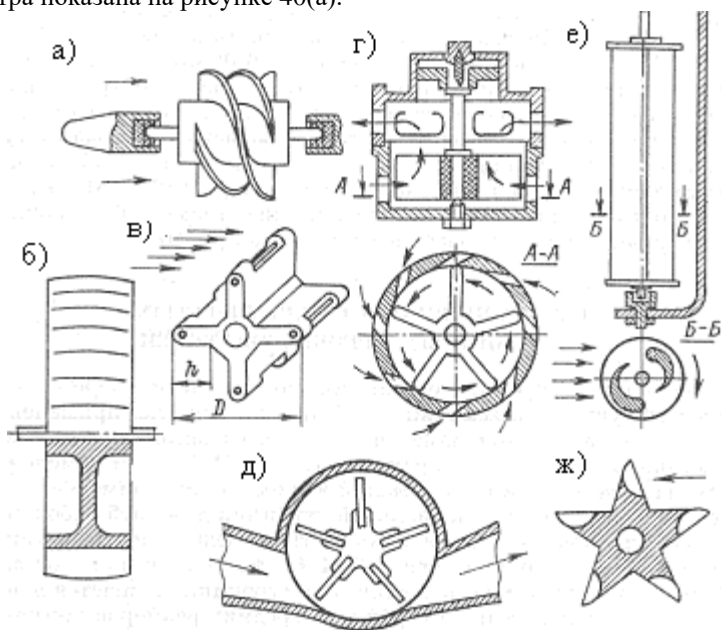


Рисунок 40 - Различные типы крыльчаток и турбин: аксиальные при малом (а) и большом (б) диаметрах; тангенциальные со светоотражательными пластинками (в), в многоструйных водосчетчиках (г), в одноструйных водосчетчиках с полуцилиндрическими лопастями (е) и лопастями полушаровой формы (ж)

Непосредственно на ступице установлены несколько лопастей (4-6), которые реализуют значительную часть винтовой линии. Ось турбинки вращается в подшипниках скольжения. В турбинках средних размеров применяют как подшипники скольжения, так и шарикоподшипники. При больших диаметрах рисунок 40(б) число лопастей возрастает до 20-24, но длина их по винтовой линии очень мала. Лопасти укрепляются на ободе, который соединяется со ступицей диском или ребрами. Поэтому высота их составляет небольшую долю диаметра турбинки. Подшипники обычно шариковые, оси могут быть как неподвижные, так и вращающиеся.

Конструкции тангенциальных турбинок более разнообразны. В большинстве случаев рисунке 40 (в—д) поток жидкости одной общей струей поступает тангенциально к турбинке. В серийных одноструйных водосчетчиках применяют крыльчатки с плоскими радиально расположенными плоскостями рисунке 40 (в). На рисунке 40 (д) показана особая конструкция маленькой крыльчатки также с плоскими радиальными лопастями, на торцах которых расположены пластины, служащие для отражения луча, падающего от осветителя на фотоэлемент тахометрического преобразователя. Иногда для изме-

рения расхода газа в трубах очень малого диаметра применяют турбинки с лопастями полушаровой формы рисунок 40 (ж).

Во избежание одностороннего изнашивания опор в одноструйных водосчетчиках применяют многоструйные водосчетчики, у которых вода поступает на радиальные лопасти крыльчатки тангенциально в виде нескольких отдельных струй рисунок 40 (г) через косые отверстия, равномерно расположенные в кольце, охватывающем крыльчатку,

В трубах большого диаметра иногда применяют турбинки, занимающие незначительную часть площади поперечного сечения потока и измеряющие местную скорость. Обычно они бывают аксиального типа. Но известны случаи применения турбинки особого типа, состоящей из двух полуцилиндрических лопастей, сдвинутых относительно друг друга и имеющих сечение, показанное на рисунке 40 (е). Ось этой турбинки перпендикулярна к потоку.

Описание лабораторной установки

Объемный расход жидкости – объем жидкости V , который проходит через живое сечение потока в единицу времени τ . Живое сечение – это сечение потока, во всех точках, которого вектор скорости направлен по нормали. Из определения следует, что Q равен:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (57)$$

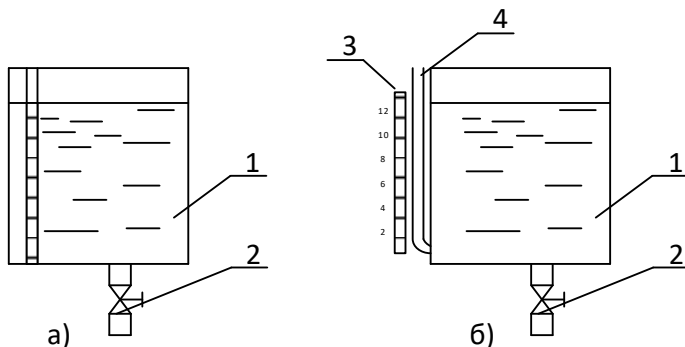


Рисунок 41 – Схема мерных баков:

а – прозрачного; б – непрозрачного;

2 – кран сливной; 2 – бак; 3 – линейка мерная; 4 – пьезометр.

Линейку градуируют в единицах высоты или единицах объема. Если линейка градуирована в единицах высоты. То объем V определится произведением:

$$V = Sh, \text{ м}^3 \quad (58)$$

где S – площадь основания емкости, равная $S = l_1 * l_2, \text{ м}^2$;

l_1 – длина основания бака, м;

l_2 – ширина бака, м;
 h – высота жидкости в баке, м.

Схема мерных баков представлена на рисунке 4.

Треугольный и прямоугольный водосливы используют для измерения расхода жидкости мощных потоков. Схема водосливов представлена на рисунке 5.

Расход жидкости через водослив определяется формулой:

$$Q = \mu \omega_B \sqrt{2gh}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (59)$$

где μ – коэффициент расхода;

ω_B -площадь живого сечения потока;

h – подъем жидкости в треугольном или прямоугольном отверстии водослива.

Площадь живого сечения потока прямоугольного водослива $\omega_B = hl$, треугольного – $\omega = h^2 \text{tg} 2,5^\circ$

Коэффициент расхода μ зависит от числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (60)$$

где u_{cp} - средняя скорость, определяемая по расходу $u_{cp} = \frac{Q}{\omega_B}$, м/с;

d и $d_{экр}$ - поперечный размер потока, $d_{экр} = \sqrt{\frac{4\omega_B}{\pi}}$, м.

Эта зависимость обычно представляется в виде графика.

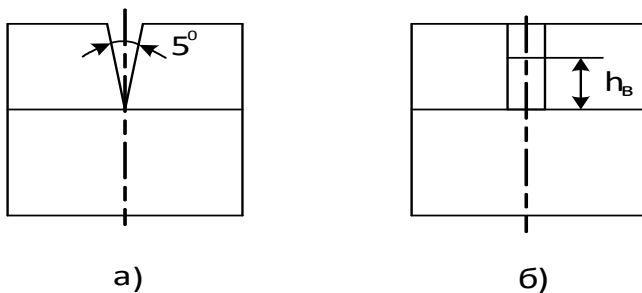


Рисунок 42 – Схема водосливов

а) треугольный, б) прямоугольный

Схема истечения жидкости через водослив представлена на рисунке

6.

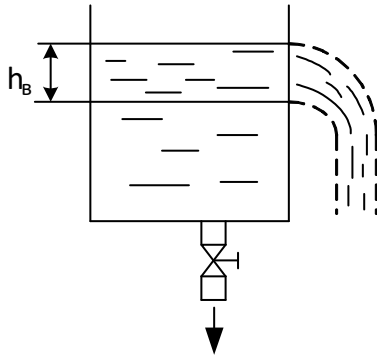


Рисунок 43 - Истечение жидкости через водослив

Порядок выполнения работы

1. Направить поток жидкости в мерный бак и засечь время наполнения.
2. Измерить высоту наполнения бака, ширину, длину или радиус основания.
3. Определить расход жидкости и его доверительный интервал.
4. Направить тот же поток жидкости в бак с водосливом, измерить высоту подъема жидкости в отверстии водослива.
5. Рассчитать площадь живого сечения потока, вытекающего через водослив, и по определенному ранее расходу жидкости определить коэффициент расхода и его доверительный интервал.
6. Исследовать зависимость коэффициента расхода водослива от числа Рейнольдса. Для этого опыты проводить, изменяя расход жидкости от нуля до максимума, общим количеством 3-8 раз.
7. Для каждого опыта рассчитать $Q, \omega, U, d_{\text{экв}}, \mu, Re$, построить график $\mu = f(Re)$ и нанести доверительный интервал.

Таблица 12 – Результаты исследований

Ширина мерного бака	Длина мерного бака	Высота наполнения мерного бака	Время наполнения мерного бака	Высота подъема жидкости в отверстии водослива	Температура воды
$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$h_b, \text{ мм}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5	6

Обработка опытных данных

1. Определяем площадь основания мерного бака:

$$\omega = l_1 \cdot l_2, \text{ м}^2 \quad (61)$$

2. Вычисляем объем жидкости в мерном баке:

$$V = \omega \cdot h, \text{ м}^3 \quad (62)$$

3. Определяем расход жидкости:

$$Q = \frac{V}{t}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (63)$$

4. Определяем площадь живого сечения потока жидкости в отверстии водослива:

$$\omega_B = h^2 \cdot \text{tg} 2,5^\circ. \quad (64)$$

1. Вычисляем коэффициент расхода:

$$\mu = \frac{Q}{\omega_B \sqrt{2gh_B}} \quad (65)$$

6. Находим кинематический коэффициент вязкости:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2}, \text{ см}^2/\text{с} \quad (66)$$

7. Рассчитываем среднюю скорость потока:

$$U = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с} \quad (67)$$

8. Находим эквивалентный размер потока:

$$d_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{4\omega_B}{\pi}}, \text{ м} \quad (68)$$

9. Определяем число Рейнольдса:

$$Re = \frac{u \cdot d_{\text{ЭКВ}}}{\nu} \quad (69)$$

Контрольные вопросы

1. Понятие расхода жидкости. Средняя скорость по расходу. Гидравлический радиус. Классификация движения жидкости: установившееся и неустановившееся движение жидкости, равномерное и неравномерное, напорное и безнапорное, струйчатое.

2. Принцип работы наиболее распространенных расходомеров. Какие виды расходов знаете.

3. От чего зависит расход жидкости через водослив.

Лабораторная работа № 8 (4 часа)

Определение коэффициента гидравлического трения

Цель работы:

- определить коэффициент сопротивления трению в трубах опытным путем ($\lambda_{\text{опыт}}$);

- вычислить теоретическое значение коэффициента сопротивления трению данного опыта ($\lambda_{\text{опыт}}$) и сравнить с опытным значением этого коэффициента;

- построить графики $\lambda_{\text{опыт}} = f(\text{Re})$ для каждой трубы.

Приборы и оборудование: лабораторная установка для определения коэффициента гидравлического трения в трубопроводах с различной шероховатостью

Основные сведения

Движение всякой вязкой жидкости по трубопроводу сопровождается потерей напора по длине, возникающей вследствие трения жидкости о стенки трубопровода, трения между слоями движущейся жидкости, а также турбулентного перемешивания. Кроме того, величина потерь зависит также от формы, размеров и шероховатости труб, а также от скорости движения и вязкости жидкости. Потеря напора – есть часть механической энергии жидкости, которая ввиду работы сил трения, распределенных по длине потока (потери по длине), а также сосредоточенных в отдельных участках потока (местные потери), переходит в тепло и необратимо теряется. Потери напора по длине $h_{\text{тр}}$, для установившегося турбулентного режима движения жидкости определяется по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{L v^2}{d 2g}, \quad (70)$$

где $h_{\text{тр}}$ – потери напора;

L – длина трубопровода;

λ – коэффициент гидравлического трения;

v – средняя скорость потока;

d – диаметр трубопровода.

Коэффициент гидравлического трения λ учитывает влияние на потерю напора по длине таких факторов, которые не получили отражения в формуле Дарси-Вейсбаха в явном виде. Важнейшим из этих факторов является вязкость жидкости и состояние стенок трубы. При турбулентном режиме движения коэффициент гидравлического трения, как установлено теорией подобия, в общем случае зависит от двух безразмерных параметров числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости K_s/d :

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{K_s}{d}\right), \quad (71)$$

Коэффициент гидравлического трения λ экспериментально определяется на основании соотношения, получаемого из формулы (5.1) Дарси-Вейсбаха:

$$\lambda = \frac{h_{TP} \cdot d \cdot 2g}{L \cdot v^2}, \quad (72)$$

Таким образом, коэффициент гидравлического трения можно определить по измеренным величинам потери напора и скоростного напора на экспериментальном участке трубопровода. Внутренняя структура потока и характеристика шероховатости поверхности трубы (относительная шероховатость) обуславливают четыре типа зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса и относительной шероховатости (см. рис. 44).

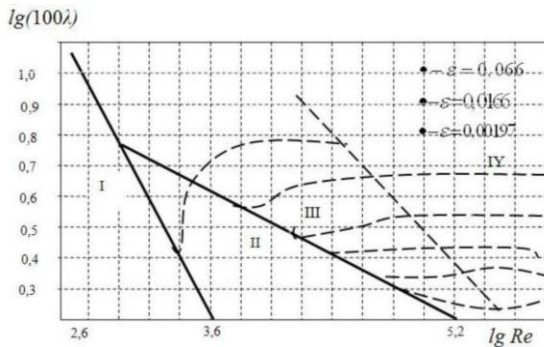


Рисунок 44 - графики Никурадзе: ламинарный режим ($\lg Re < 3,4$ или $Re < 2320$), зона гладких труб ($4000 < Re < 10d/K\varepsilon$); зона шероховатых труб ($10d/K\varepsilon < Re < 500d/K\varepsilon$); квадратичная (автомодельная) зона ($Re > 500d/K\varepsilon$)

1. Ламинарный режим ($Re < 2300$). Обтекание выступов шероховатости стенок трубы плавное, вследствие чего относительная шероховатость не влияет на величину коэффициента λ , т.е. $\lambda = f(Re)$. Этот коэффициент зависит только от скорости потока и определяется по формуле Пуазейля (5.4)

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

2. Гидравлически гладкие трубы ($4000 < Re < 10^5$). Поток состоит из турбулентного ядра и ламинарного пристеночного подслоя. Толщина ламинарного подслоя больше среднего значения абсолютной шероховатости. Поэтому коэффициент λ не зависит от относительной шероховатости, а зависит только от числа Re , т.е. $\lambda = f(Re)$. Коэффициент гидравлического трения λ определяется по формуле Блазиуса (44)

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (73)$$

3. Доквадратичная область (шероховатых труб) $105 < Re < 500d/k\varepsilon$. Толщина ламинарного подслоя соизмерима с величиной значения абсолютной шероховатости. Отдельные выступы выходят за пределы ламинарного подслоя и влияют на сопротивление движению. Коэффициент гидравлического трения λ зависит как от числа Рейнольдса, так и от относительной шероховатости и определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K\varepsilon}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (74)$$

4. Квадратичная (автомодельная) область ($Re > 500 \cdot d/K\varepsilon$) Развитый турбулентный режим. Толщина ламинарного слоя уменьшается по мере увеличения Re и намного меньше среднего значения абсолютной шероховатости. Поэтому коэффициент λ зависит только от относительной шероховатости $K\varepsilon/d$ и определяется по формуле Шифрисона:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K\varepsilon}{d} \right)^{0,25} \quad (75)$$

Особо следует выделить область, соответствующую переходному режиму ($2300 < Re < 4000$). Для этой области характерна перемежающаяся турбулентность, т. е. постоянно происходит изменение структуры потока из ламинарной в турбулентную и обратно коэффициент Дарси λ можно определить по формуле Френкеля:

$$\lambda = \frac{2,7}{Re^{0,53}} \quad (76)$$

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 45) включает в себя следующие основные элементы: два исследуемых трубопровода с различной шероховатостью внутренней поверхности, краны 4 для переключения трубопроводов, центробежный насос с приводом 1 для циркуляции жидкости, расходомер 8 для определения объема жидкости в опыте, – вакуумметр 5 для измерения вакуумметрического давления во всасывающем трубопроводе, манометр 6 для измерения избыточного давления в напорном трубопроводе, вольтамперметр 9 для измерения напряжения и силы тока потребляемой приводом насоса.

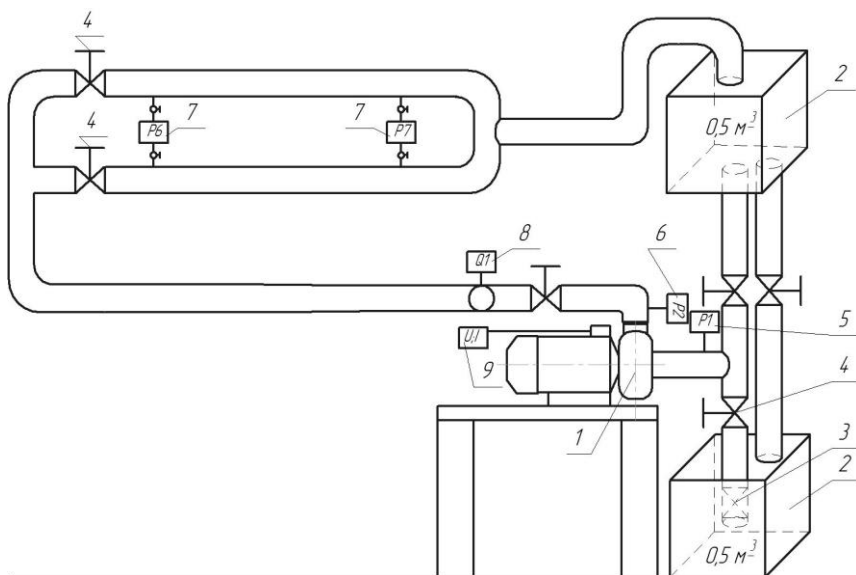


Рисунок 45 - Схема лабораторной установки: 1 – центробежный насос с приводом; 2 – резервуар; 3 – обратный клапан; 4 – кран шаровый; 5 – вакуумметр; 6,7 – манометр; 8 – расходомер; 9 – вольтамперметр.

Порядок выполнения работы

Предварительно подготовить установку для проведения опытов (рис. 45).

Кран 5, расположенный на выходе из трубопровода переменного сечения 7, должен быть закрыт. Включить насос 1 и заполнить напорный резервуар 2 до заданного уровня, который поддерживается постоянным.

После этого приступают к выполнению опытов.

Плавно приоткрывают регулировочный кран 5, краном 9 регулируют постоянный перелив жидкости, пока установится желательный режим опыта. Режимы опытов рекомендуется выбрать такими, чтобы скоростной напор в наиболее узком сечении трубопровода переменного сечения находился в пределах 5 – 15 см. При установлении режима опыта нужно следить за тем, чтобы в резервуаре 2 обеспечивался постоянный напор $H = \text{const}$.

Фиксируется положение линии гидродинамического напора и пьезометрической линии, для чего верхние каретки в каждом сечении устанавливаются по уровню жидкости в трубках полного напора, а нижние – по уровню жидкости в пьезометрах. Результаты эксперимента записывают в таблицу 4.2.

Таблица 13 – Результаты исследований

Наименование характеристики, их обозначение и размерность	Технически гладкие трубы			Технически шероховатые трубы		
	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт
Расход воды в опыте, Q м ³ /с						
Показания манометра в начале трубопровода P ₁ /γ, м в. ст.						
Показания манометра в конце трубопровода P ₂ /γ, м в. ст.						

Методика проведения работы

6.1 Средняя скорость в трубе, м/с

$$V_{cp} = \frac{Q}{\omega} \quad (77)$$

6.2 Потери напора на преодоление трения в трубе, h_t, м в. ст.

$$h_t = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad (78)$$

6.3 Коэффициент сопротивлению трению опытный, λ_{опыт}

$$\lambda_{опыт} = \frac{2 \cdot g \cdot d}{l \cdot V^2} \cdot h_t \quad (79)$$

6.4 Число Рейнольдса, Re

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (80)$$

6.5 Толщина пограничного ламинарного слоя, δ, мм

$$\delta = \frac{68,4 \cdot r}{Re^{0,875}} \quad (81)$$

6.6 Коэффициент сопротивлению трению, вычисленный по формуле, λ_{теор}:

- если число Рейнольдса лежит в пределах 2320 < Re < 10⁵, то коэффициент сопротивления трению λ определяется по формуле Блауиза:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (82)$$

- если число Рейнольдса Re > 10⁵, то λ определяется по формуле Никурадзе:

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \quad (83)$$

6.7 Область между нижним и верхнем пределом чисел Рейнольдса – область гидравлически не вполне шероховатых труб. В ней пограничный ламинарный слой приблизительно равен высоте выступов естественной шероховатости ($\delta \approx \Delta$; $\lambda = f(\text{Re}; \Delta)$). Для этой области λ следует определять по частным формулам Шевелева, в зависимости от материала трубопровода:

$$\lambda_{\text{сталь}} = \frac{0,0216}{d^{0,3} \cdot V^{0,214}} \quad (84)$$

где: d – диаметр трубопровода, м;
 V – скорость движения, м/с.

6.8 Область прямых параллельно оси Рейнольдса – область гидравлически вполне шероховатых труб. В ней пограничный ламинарный слой гораздо меньше выступов естественной шероховатости ($\delta \ll \Delta$; $\lambda = f(\Delta)$).

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{r}{\Delta} + 1,74\right)^2} \quad (85)$$

где: r – радиус трубопровода, мм;

Таблица 14 – Обработка опытных данных

Наименование характеристик, их обозначение и размерность	Технически гладкие трубы			Технически шероховатые трубы		
	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт
Средняя скорость в трубе, м/с						
Потери напора на преодоление трения в трубе, h_f , м в. ст.						
Коэффициент сопротивления трению опытный, $\lambda_{\text{опыт}}$						
Число Рейнольдса, Re						
Высота выступов шероховатостей исследуемой трубы, Δ , мм	-	-	-	0,25	0,25	0,25
Толщина пограничного ламинарного слоя, δ , мм						
Коэффициент сопротивления трению, вычисленный по формуле, $\lambda_{\text{теор}}$						
Расхождение: $\lambda_{\text{опыт}}$ и $\lambda_{\text{теор}}$, %						

Таблица 15 – Координаты точек для зависимости $\lambda = f(\text{Re})$.

Технически гладкие трубы		Технически шероховатые трубы	
$\lg \text{Re}$	$\lg 100\lambda_{\text{опыт}}$	$\lg \text{Re}$	$\lg 100\lambda_{\text{опыт}}$

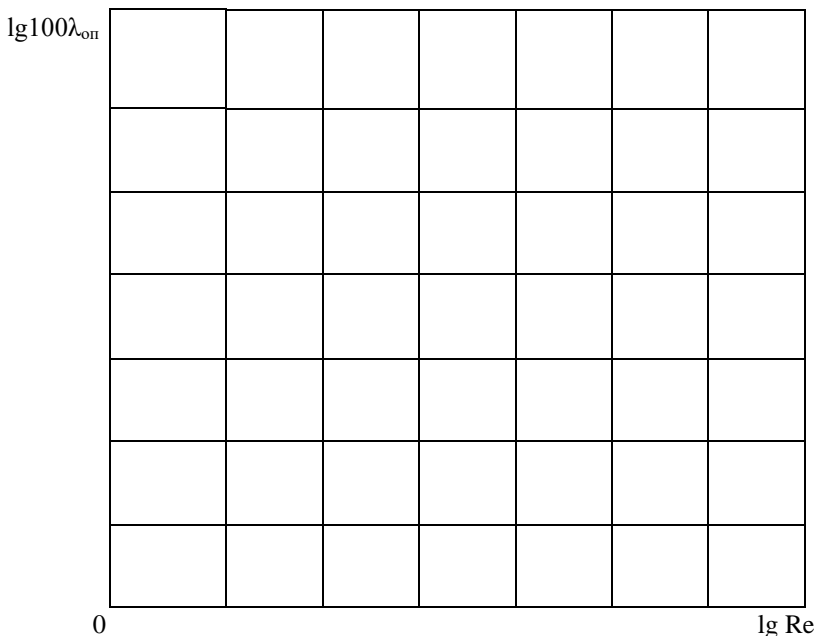


Рисунок 46 – Сетка для построения графика

Контрольные вопросы

1. Понятие о гладких и шероховатых трубах.
2. Влияние шероховатости и режима движения на коэффициент трения (графики Никурадзе).
3. Какие причины вызывают потери напора на трение?
4. Формула Дарси-Вейсбаха, обозначить входящие в нее величины.
5. Какие бывают области сопротивления при движении жидкости?
6. Понятие об экономически наивыгоднейшем диаметре трубопровода.
7. Классификация трубопроводов. Основные формулы для расчета трубопроводов.

Лабораторная работа № 9

Экспериментальное изучение прямого гидравлического удара в напорном трубопроводе

Цель работы: Определить опытным путем величину повышения давления $\Delta p_{\text{оп}}$ при прямом гидравлическом ударе в напорном трубопроводе, сравнить ее с величиной Δp , вычисленной по формуле Н. Е. Жуковского, и подсчитать относительное отклонение.

Приборы и оборудование: лабораторная установка для исследования параметров гидравлического удара

Общие сведения

Гидравлическим ударом называется изменение (повышение или понижение) давления в напорном трубопроводе при резком изменении скорости движения жидкости (например, в результате резкого закрытия или открытия затвора).

Повышение давления при гидравлическом ударе может быть настолько большим, что способно привести к разрыву трубопровода.

При быстром закрытии затвора сначала остановится не вся масса жидкости, заключенная в трубопроводе, а лишь часть ее, находящаяся непосредственно перед затвором (рис. 47). Это происходит благодаря инерции и упругим свойствам жидкости и материала трубы (остановившаяся масса жидкости несколько сжимается, труба расширяется, а давление в жидкости резко возрастает). Затем повышение давления весьма быстро распространяется по трубопроводу от затвора к резервуару. Скорость распространения повышения давления называют скоростью распространения ударной волны. После того как во всем трубопроводе давление повысится, жидкость начнет выходить из зоны повышенного давления обратно в резервуар, давление в трубопроводе начнет понижаться. Затем в зону пониженного давления снова пойдет жидкость из резервуара - давление снова повысится. Благодаря упругим свойствам жидкости и стенок трубопровода этот процесс довольно быстро затухает. Наиболее опасным является первое повышение давления.

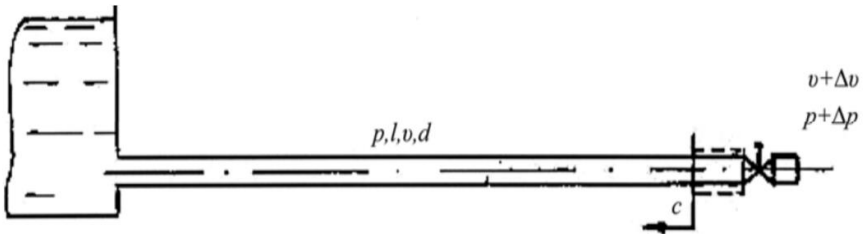


Рисунок 47 - Схема гидравлического удара

Ударная волна пройдет по всему трубопроводу (от затвора до резервуара) за время $t = l/C$ (здесь l – длина трубопровода). Время одного цикла, включающего повышение и понижение давления, называется фазой удара $T = 2l/C$.

Если время закрытия t_3 затвора меньше или равно фазе удара T ($t_3 \leq T$), удар называется прямым.

Удар может возникнуть, например, при внезапном выключении насоса, подающего воду по нагнетательному трубопроводу в резервуар. Жидкость после выключения насоса по инерции некоторое время будет двигаться, и в трубопроводе возникнет пониженное давление. Затем начнется обратное движение жидкости из резервуара в область пониженного давления в трубопроводе, и давление здесь повысится подобно тому, как это наблюдалось при прямом ударе.

Из изложенного ясно, что параметры движения жидкости при гидравлическом ударе изменяются с течением времени. Следовательно, при гидравлическом ударе движение жидкости является неустановившимся.

Для определения повышения давления Δp при прямом гидравлическом ударе Н. Е. Жуковским в 1898 г. предложена формула

$$\Delta p = \rho C \mathcal{Q}, \quad (86)$$

где ρ – плотность жидкости;

C – скорость распространения ударной волны;

\mathcal{Q} – средняя скорость движения жидкости в трубопроводе до закрытия затвора (при установившемся движении).

Величину C вычисляют по формуле

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} d}{E_{мр} \delta}}}, \quad (87)$$

где $\sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}} = C_{зв}$ – скорость звука в жидкой среде (для воды $C_{зв} \approx 1425$ м/с);

$E_{ж}$ и $E_{тр}$ – модули упругости соответственно жидкости и материала трубопровода (для воды $E_{ж} \approx 1,96 \cdot 10^9$ Па, для стали $E_{тр} \approx 1,96 \cdot 10^{11}$ Па);

d – внутренний диаметр трубопровода;

δ – толщина стенки трубопровода.

Описание лабораторной установки

Установка (рис. 48) состоит из горизонтального трубопровода 3, присоединенного к напорному резервуару 2, в котором уровень воды во время опытов поддерживается на постоянной отметке с помощью переливного устройства 1. В конце трубопровода 3 имеется вентиль 6 для регулирования скорости движения воды в нем, клапанный затвор 5, позволяющий практически мгновенно перекрывать трубопровод, пружинный манометр 4, с помо-

щью которого измеряется давление в жидкости до и в момент закрытия затвора.

Для измерения расхода воды служит мерный бак 12, оборудованный сливом 11, снабженный водомерной трубкой 9 со шкалой 10, и секундомер 8.

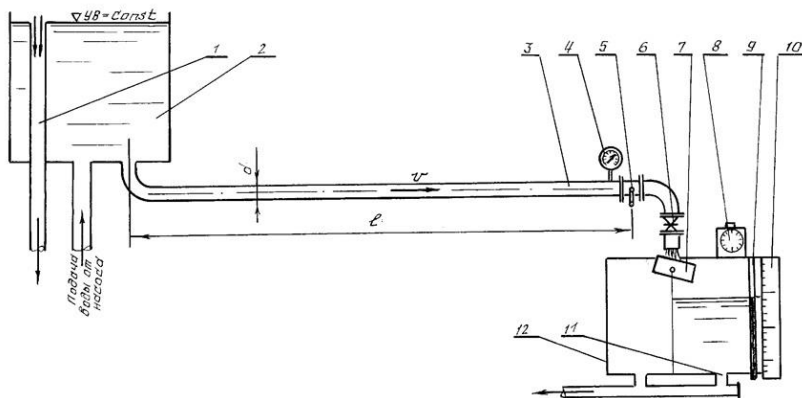


Рисунок 48 – Схема лабораторной установки для исследования параметров гидравлического удара

1 – переливное устройство; 2 – напорный резервуар; 3 – напорный трубопровод; 4 манометр; 5 – клапанный затвор; 6 – вентиль; 7 – отсекатель; 8 – секундомер; 9 – водомерная трубка; 10 – шкала; 11 – слив; 12 – мерный бак

Методика проведения работы

1. Измерить по манометру 4 давление в трубопроводе 3 до удара (при закрытом вентиле 6) и результаты измерения записать в табл. 16.
2. Открыв (не полностью) вентиль 6, обеспечить пропуск по трубопроводу 3 некоторого расхода воды.
3. Измерить расход воды Q с помощью мерного бака 12 и секундомера 8. При этом измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров.
4. Перекрыть затвором 5 трубопровод 3 и измерить по манометру 4 величину максимального давления при ударе.
5. Записать в табл. 9 полученные при измерениях данные.
6. Сделать еще два аналогичных опыта при других расходах воды.
7. Обработать опытные данные так, как указано в табл. 9.
8. Дать заключение по результатам работы.

Таблица 16 – Результаты исследований и обработки опытных данных

Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений		
		Номер опыта		
		1	2	3
Внутренний диаметр трубопровода d	м			
Толщина стенки трубопровода δ	м			
Площадь поперечного сечения трубопровода $\omega = \pi d^2/4$	м ²			
Объем воды в мерном баке W	м ³			
Время наполнения объема t	с			
Расход воды в трубопроводе $Q = W/t$	м ³ /с			
Средняя скорость движения воды в трубопроводе (до удара) $V = Q/\omega$	м/с			
Скорость распространения ударной волны $C = \frac{1425}{\sqrt{1 + E_g d / E_{Tp} \cdot \delta}}$	м/с			
Повышение давления при ударе по формуле Н. Е. Жуковского $\Delta p = \rho CV$	Па			
Давление в трубопроводе до удара (по манометру) p_1	Па			
Наибольшее давление в трубопроводе при ударе (по манометру) p_2	Па			
Повышение давления при ударе (по опытам) $\Delta p_{оп} = p_2 - p_1$	Па			
Относительное отклонение $\Delta_{\Delta p} = \frac{ \Delta p - \Delta p_{оп} }{\Delta p} \cdot 100$	%			

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятие гидравлического удара.
2. Прямой и непрямой гидравлический удар.
2. Что такое фаза удара?
3. Объясните процесс изменения давления в трубопроводе, питаемом из резервуара, при прямом гидравлическом ударе.
5. Напишите и поясните формулу Н. Е. Жуковского для определения повышения давления при ударе.
6. Напишите и поясните формулу для определения скорости распространения ударной волны.

Лабораторная работа № 10 (4 часа)

Исследование нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель

Цель работы:

- Экспериментальное определение времени заполнения рабочей полости пружинного аккумулятора через гидродроссель;
- Экспериментальное определение времени опорожнения через гидродроссель рабочей полости пружинного аккумулятора;

Приборы и оборудование: Стенд НТЦ 17.00 «Гидравлика»

Основные сведения

Чаще всего встречаются два случая истечения через гидродроссель. В первом случае жидкость от источника энергии через дроссель поступает в торцевую полость подпружиненного золотника или поршня, то есть рассматривается процесс заполнения рабочей полости, в которой перемещается подпружиненный поршень или золотник. Во втором случае рассматривается процесс опорожнения полости через гидродроссель. При этом линия с установленным в нее дросселем подключается к сливу.

Рассматриваемые процессы относятся к нестационарным, так как и при заполнении и при опорожнении полости через гидродроссель изменяются во времени фазовые переменные – давления и расходы (скорости).

На рисунке 49 приведена расчетная схема процессов заполнения и опорожнения через гидродроссель ДР рабочей полости Б пружинного гидроаккумулятора.

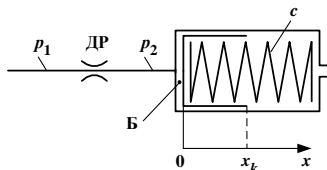


Рисунок 49 – Расчетная схема процессов заполнения и опорожнения через гидродроссель

При рассмотрении указанных процессов решается задача определения времени заполнения $t_{\text{зап}}$ и времени опорожнения $t_{\text{оп}}$ полости Б пружинного аккумулятора.

На схеме (см. рис. 49) приняты следующие обозначения: p_1 и p_2 – давления; c – жесткость пружины; x – координата поршня ($x=x_k$ соответствует полному заполнению полости Б).

При математическом описании процессов заполнения и опорожнения полости Б принимались следующие допущения: силы трения и инерции, действующие на жидкость и поршень, равны нулю; потери энергии при течении жидкости учитываются только на гидродросселе ДР.

Для процессов заполнения и опорожнения при принятых допущениях были составлены две системы дифференциальных уравнений, в результате решения которых получены следующие выражения:

– процесс заполнения полости Б ($p_1 = \text{const}$)

$$t_{\text{зап}} = \frac{2S_n^2}{c \mu S_{\text{др}}^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \left(\sqrt{p_1 - \frac{F_o}{S_n}} - \sqrt{p_1 - \frac{F_o + c x_k}{S_n}} \right) \quad (88)$$

– процесс опорожнения полости Б ($p_1 = 0$)

$$t_{\text{оп}} = \frac{2S_n^2}{c \mu S_{\text{др}}^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \left(\sqrt{\frac{F_o + c x_k}{S_n}} - \sqrt{\frac{F_o}{S_n}} \right) \quad (89)$$

где S_n – площадь поршня, $S_{\text{п}} = \frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4}$ ($D_{\text{п}}$ – диаметр поршня);

$S_{\text{др}}$ – площадь проходного сечения дросселя;

ρ – плотность рабочей жидкости;

F_o – усилие преднатяга пружины (при $x = 0$);

x_k – ход поршня.

На рисунке 50 приведены графики изменения давления p_2 в полости аккумулятора

а)

б)

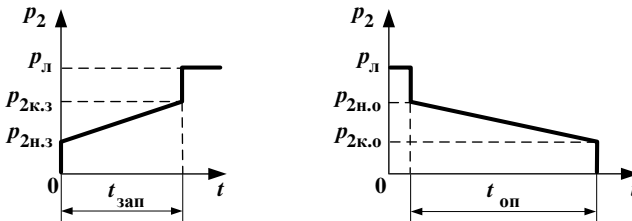


Рисунок 50– Характеристики процессов функционирования пружинного гидрораккумулятора:

а – процесс заполнения; б – процесс опорожнения.

Процесс заполнения полости аккумулятора (см. рис. 50, а) начинается при $t = 0$ и достижении давлением величины $p_{2н.з}$ ($p_{2н.з} = F_0 / S_{п}$). При $p_2 < p_{2н.з}$. включается электронный секундомер. Затем начинается процесс заполнения рабочей полости аккумулятора. При $p_2 = p_{2к.з}$. ($p_{2к.з} = (F_0 + c x_k) / S_{п}$) поршень касается ограничения хода ($x = x_k$) и давление практически мгновенно возрастает до линейного давления в системе $p_{л}$. При $p_2 > p_{2к.з}$. выключается электронный секундомер. На цифровом табло секундомера отображается величина $t_{зап}$.

Процесс опорожнения полости аккумулятора (см. рис. 50, б) начинается после выключения распределителя Р2. При этом давление p_2 резко понижается с $p_{л}$ до $p_{2н.о}$. ($p_{2н.о} = (F_0 + c x_k) / S_{п}$). Когда $p_{л} > p_2 > p_{2н.о}$, включается электронный секундомер. Процесс опорожнения происходит под действием усилия пружины, действующего на поршень аккумулятора. При достижении давлением значения $p_{2к.о}$. ($p_{2к.о} = F_0 / S_{п}$) поршень касается ограничения хода ($x = 0$) и давление p_2 резко падает. При $p_2 < p_{2к.о}$ отключается электронный секундомер и на табло отображается время опорожнения полости аккумулятора $t_{оп}$.

Методика проведения работы

Коэффициент местного сопротивления гидродросселя можно определить из следующего выражения:

$$\zeta = \frac{d_k^4}{\mu^2 d_{др}^4} \quad (90)$$

где d_k – диаметр канала, в котором установлен дроссель;

μ – коэффициент расхода дросселя, для отверстия круглой формы

$$\mu = 0,62 \dots 0,65.$$

Объектом испытаний в данной работе является подсистема стенда, представленная на рисунке 51.

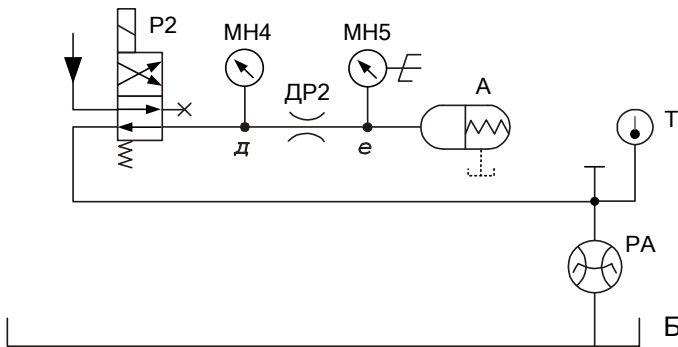


Рисунок 51 – Схема объекта испытаний.

Гидродроссель ДР2 установлен на участке де. Для измерения давления в сечении е используется электроконтактный манометр МН5, используемый для управления электронным секундомером. Для подключения аккумулятора к напорной линии насоса (процесс заполнения) или к сливу жидкости в гидробак Б (процесс опорожнения) служит двухпозиционный гидрораспределитель Р2. Устройство пружинного аккумулятора практически полностью соответствует схеме, представленной на рисунке 51.

Перед включением установки необходимо убедиться, что:

– тумблеры управления гидрораспределителями Р1 и Р2 установлены в положение «Выкл»;

– тумблер установки режима работы электронного секундомера установлен в положение «Авт», а тумблер включения питания секундомера установлен в нижнее положение.

Включить электрическое питание стенда («Сеть»), электродвигателя М (кнопка «Пуск»), питание электронного секундомера (тумблер установить в положение «Вкл»). Дать возможность поработать стенду в течение 3...5 мин. Включить тумблер управления секундомером в положение «Счет», а тумблер Р2 в положение «Вкл.».

Таблица 17 – Результаты исследований процесса заполнения полости аккумулятора.

Номер опыта	Давление на входе p_1 , МПа	Время заполнения полости $t_{\text{зап}}$, с	Среднее значение времени $t_{\text{зап ср}}$, с	Расчетное значение $t_{\text{зап р}}$, с
1				
2				
3				
4				
5				

После того, как закончился процесс заполнения полости аккумулятора и зафиксировано время $t_{\text{зап}}$, необходимо сбросить (обнулить) показания табло секундомера и перейти к определению времени опорожнения полости аккумулятора. Для этого необходимо тумблер управления гидрораспределителем Р2 установить в положение «Выкл». При этом рабочая полость аккумулятора через дроссель ДР2 будет подключена к сливу. Результаты исследования процессов заполнения и опорожнения необходимо записывать в таблицы 8.1 и 8.2 соответственно.

Таблица 18 – Результаты исследований процесса опорожнения полости аккумулятора

Номер опыта	Время опорожнения полости $t_{оп}$, с	Среднее значение времени $t_{оп,ср}$, с	Расчетное значение $t_{оп,р}$, с
1			
2			
3			
4			
5			

После считывания значения $t_{оп}$ (по секундомеру) показание табло секундомера обнуляется и может снова переходить к исследованию процесса заполнения полости.

После выполнения всех опытов необходимо тумблер управления гидрораспределителем P2 установить в положение «Выкл.», отключить электрическое питание секундомера, электродвигателя и стенда.

Среднее значение времени заполнения полости аккумулятора определяется как среднее арифметическое:

$$t_{зап,ср} = \left(\sum_{i=1}^n t_{зап,i} \right) / n, \quad (91)$$

где n – количество опытов ($n = 5$).

Аналогично определяется и среднее значение времени опорожнения полости аккумулятора $t_{оп,ср}$.

Для определения расчетным путем времени заполнения $t_{зап,р}$ нужно воспользоваться формулой (88), а для определения времени опорожнения $t_{оп,р}$ – формулой (89).

При определении $t_{зап,р}$ в формулу (88) нужно подставлять среднее значение p_1 (определенное по результатам измерений в пяти опытах, см. второй столбец таблицы 17).

Остальные параметры, необходимые для вычисления $t_{зап,р}$ и $t_{оп,р}$, следующие:

- диаметр поршня аккумулятора $D = 0,06$ м (60 мм);
- диаметр дросселя $d_{др} = 1 \cdot 10^{-3}$ м (1 мм);
- коэффициент расхода дросселя $\mu = 0,62$;
- усилие преднатяга пружины $F_0 = 450$ Н;
- жесткость пружины $c = 8000$ Н/м (8 Н/мм);
- ход поршня $X_k = 0,065$ м (65 мм);
- плотность масла ρ , кг/м³.

Контрольные вопросы

1. Устройство лабораторного стенда?
2. Назначение, устройство и характеристики гидродросселя?
3. Как определяется коэффициент местного сопротивления гидродросселя?

Лабораторная работа № 11 (4 часа)

Исследование работы центробежного насоса

Цель работы: экспериментальное исследование центробежного насоса и построение его характеристик (производительность и напор).

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 15.

Основные сведения

Насосы представляют собой гидравлические машины, преобразующие механическую энергию приводящих двигателей в энергию потока жидкости и служащие для перемещения и создания напора жидкостей всех видов, механической смеси жидкости с твёрдыми и коллоидными веществами или сжиженных газов. Следует заметить, что машины для перекачки и создания напора газов выделены в отдельные группы и в отличие от жидкостей получили название вентиляторов и компрессоров. Большое разнообразие перемещаемых жидкостей и условий, в которых приходится работать насосам, вызвало появление огромного количества различных конструкций насосов.

По принципу действия насосы можно разделить на объёмные и динамические. В работе объёмных насосов преобладают силы давления, в динамических - силы инерции.

В динамических насосах перемещение рабочей среды происходит од воздействием гидродинамических сил в насосной камере, которая постоянно сообщается с входом и выходом насоса - объём насосной камеры неизменен.

Для динамических насосов характерно двойное преобразование энергии (1 этап: механическая => кинетическая + потенциальная; 2 этап: кинетическая => потенциальная). В динамических насосах можно перекачивать загрязнённые жидкости. Они обладают большей равномерностью подачи и уравновешенностью рабочего процесса, способностью создавать большие подачи. Но в отличие от объёмных насосов они не способны к самовсасыванию.

Динамические насосы по виду сил, действующих на жидкую среду, подразделяются на насосы лопастные, трения и электромагнитные. Наибольшее распространение из лопастных насосов получили центробежные, а из насосов трения - вихревые насосы.

Насос центробежный - устройство, перекачиваемое жидкие среды за счёт действующей на них центробежной силы. Основным элементом, например, одноступенчатого моноблочного центробежного насоса (рис. 52) является рабочее колесо, состоящее из двух дисков, соединённых изогнутыми лопа-

стями. Жидкость, находящаяся во внутренней части насоса перед его запуском, при вращении рабочего колеса захватывается лопастями и начинает перемещаться вместе с ними, затем под воздействием центробежной силы стремительно отбрасывается к периферии и попадает в улиткообразный спиральный канал, который кольцом охватывает рабочее колесо.

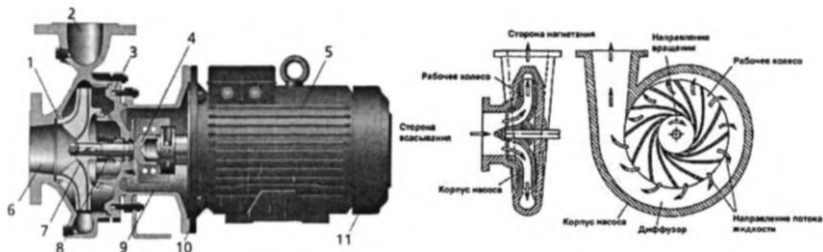


Рисунок 52 - Схема центробежного насоса

1 - дросселирующая щель; 2, 6 - патрубки напорный и всасывающий; 3 - корпус насоса («улитка»); 4 - вал; 5 - корпус двигателя; 7 - рабочее колесо с лопастями; 8 - уплотнение вала; 9 - поддон привода; 10, 11 - подшипники качения

Увеличивающееся к выходному патрубку (отводу) поперечное сечение спирального канала приводит к плавному снижению большой скорости, полученной жидкостью на выходе из рабочего колеса, до нормальной скорости в нагнетательном трубопроводе. При этом часть кинетической энергии жидкости переходит в потенциальную, что сопровождается увеличением давления (напора) жидкости. При перемещении через область напорного патрубка жидкость, находящаяся под высоким давлением, выталкивается в него. При откидывании перекачиваемой насосом жидкости к стенкам рабочей камеры в центральной части последней создаётся разрежение воздуха, что способствует всасыванию жидкой среды через входной патрубок и попаданию её по входному осевому каналу в центральную часть рабочего колеса.

Особенностью эксплуатации центробежных насосов является то, что перед пуском их внутреннюю полость заполняют перекачиваемой жидкостью не ниже оси насоса, поэтому насосную установку оборудуют устройством для залива насоса. За счёт вышеописанного принципа работы в центробежных насосах обеспечивается непрерывность процесса всасывания и выталкивания перекачиваемой жидкости при вращении рабочего колеса, что, в отличие от поршневых устройств, не создаёт пульсаций напора жидкости в напорном трубопроводе.

В зависимости от числа установленных внутри корпуса рабочих колёс центробежные насосы делятся на одно- и многоступенчатые.

Основными параметрами работы насосов являются; подача, напор, мощность привода, коэффициент полезного действия и частота вращения рабочего колеса. Подачей (расходом) насоса называется количество жидкости

(объём), подаваемое насосом за единицу времени в напорный трубопровод.

Напором насоса называется механическая энергия, сообщаемая насосом единице веса (1 Н) жидкости. Поэтому напор имеет линейную размерность (м. ст. ж.); $Dж/Н = Н м / Н = м$. Напор насоса равен разности полного гидродинамического напора (удельной энергии жидкости) за насосом (в нагнетательном трубопроводе) и полного гидродинамического напора перед ним (во всасывающем трубопроводе).

При подборе насоса рассчитывают его потребный напор, при этом затрачиваемая мощность или мощность, подводимая к валу насоса, всегда больше полезной (или теоретической) мощности насоса из-за потерь энергии.

При работе насоса разность давлений в приёмном резервуаре и в корпусе насоса должна быть достаточной для преодоления давления столба жидкости и гидравлических сопротивлений во всасывающем трубопроводе.

При опускании давления на входе в насос (во всасывающем трубопроводе) до давления насыщения паров перекачиваемой жидкости при данной температуре наступает кавитация (пустотообразование) - процесс нарушения сплошности течения жидкости, который сопровождается повышением местных температур и давления, что вызывает гидравлические удары. Это явление приводит к разрушению рабочих органов насоса. Поэтому кавитация в насосах недопустима. Особенно быстро разрушаются алюминий и механически обработанный чугун, а наиболее стойкой оказывается обладающая большой вязкостью нержавеющей сталь. Стойкость против кавитационного разрушения можно повысить шлифовкой и полировкой металлов, а также применением стойких материалов, что позволяет непродолжительное время работать в условиях местной кавитации. Первым и главным условием устранения кавитации является правильное назначение допустимой высоты всасывания (обычно 6-7 м).

В многоступенчатых насосах (рис. 53) для повышения напора жидкость, выходящая из первого рабочего колеса, поступает на второе рабочее колесо, затем на третье и т.д. В зависимости от своего конструктивного исполнения они могут быть секционными или спиральными. Современные модели многоступенчатых насосов секционного типа способны обеспечить производительность процесса перекачивания жидкости до $900 м^3$, при этом общий напор рабочей среды примерно равен сумме напоров, приобретённых жидкостью в каждом рабочем колесе, и может достигать до 1900 м вод. ст.

В зависимости от пространственного положения оси рабочего вала центробежные насосы (как многоступенчатые, так и одноступенчатые) делятся на устройства с горизонтальным и вертикальным расположением рабочей оси.

По расположению относительно перекачиваемой жидкой среды насосы делятся на поверхностные (или наземные), погружные и полу погружные.

Поверхностные располагаются на поверхности земли, вне скважины, но поблизости от неё (глубина скважины не должна превышать десяти метров).

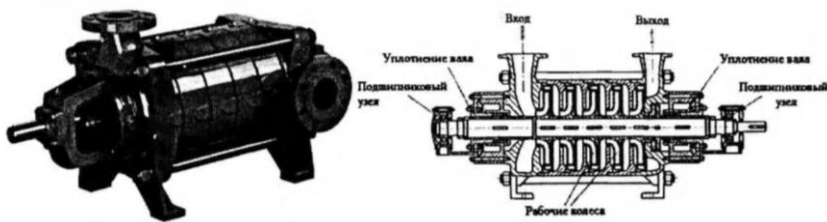


Рисунок 53 - Схема горизонтального многоступенчатого секционного центробежного насоса с двойным подшипником

Рабочее колесо (крыльчатку) условно можно разделить на следующие части: передний диск 1, задний (коренной) диск 2, ступица 3 и лопатки 4 (рис. 54,а). Колеса насосов изготавливают закрытой конструкции (есть все перечисленные части), полуоткрытой (без переднего диска) и открытой (без переднего и заднего дисков). Большинство насосов имеют рабочие колеса закрытой конструкции. Рабочие колеса полуоткрытой и открытой конструкции применяются в насосах специального назначения, перекачивающих загрязнённые жидкости (шламовые, фекальные, углесосы и т. д.).

Рабочие колеса бывают одностороннего и двухстороннего всасывания. Рабочие колеса двухстороннего всасывания (рисунок 54, б) представляют собой соединённые в одной детали два обычных колеса. Из условия прочности диски колеса утолщаются по направлению к втулке. Скорость на внешней окружности литых чугунных колёс не более 34-35 м/с.

Лопастни располагаются под определённым углом, их изгиб направлен в сторону, противоположную направлению вращения рабочего колеса. Форма профиля лопасти должна быть такой, чтобы на всем протяжении её приращение абсолютной скорости было плавным, равномерным и обеспечивало бы требуемые углы входа и выхода. Лопастни профилируются по дуге окружности или по логарифмической спирали и имеют толщину: чугунные 4—8 мм, бронзовые 3-6 мм.

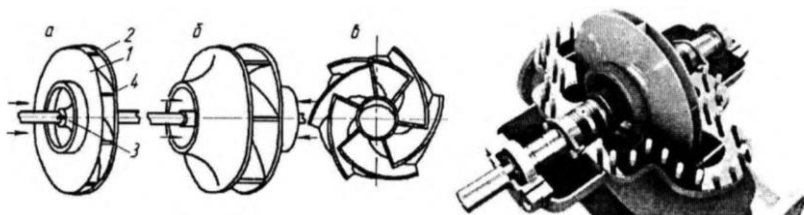


Рисунок 54 - Виды рабочих колёс центробежных насосов
 а - закрытое, одностороннего действия; б - закрытое, двухстороннего действия; в - полуоткрытое

Центробежные насосы погружного типа в процессе эксплуатации полностью погружаются в перекачиваемую среду (рисунок 55). Отдельные

модели вертикальных центробежных насосов погружного типа могут размещаться даже в трубе, по которой осуществляется откачивание жидкой среды. Погружные насосы практически не издадут шума при своей работе,

поскольку полностью находятся в жидкой среде. Корпус насосов данного типа, который изготавливают преимущественно из нержавеющей стали, должен отличаться абсолютной герметичностью, что обеспечивается использованием при его сборке уплотнительных элементов.

Разгерметизация корпуса центробежных водяных насосов погружного типа может привести к тому, что их приводной электродвигатель просто выйдет из строя. При использовании погружных насосов воду из обслуживаемой скважины можно поднимать с глубины 40 метров и более. Насосы погружного типа способны обеспечить перекачивание жидкой среды с производительностью до $16 \text{ м}^3/\text{ч}$, при этом её напор может достигать 200 м вод. ст.

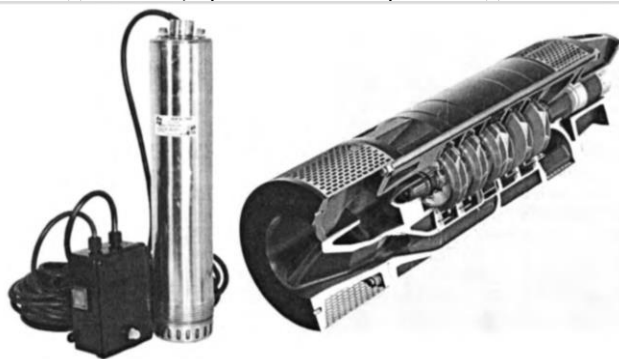


Рисунок 55 - Центробежный насос погружного типа

Для неагрессивной воды рабочие колеса изготавливаются литыми из чугуна или стали, для кислотной — из легированных хромом и никелем сталей, хромистого или кремнистого чугуна, кислотоупорных бронз и пластмасс.

Рабочие колёса могут быть следующих типов: осевые, радиальные, диагональные. В основном, в насосных устройствах крыльчатка трёхмерной конструкции, которая соединяет плюсы осевых и радиальных колёс.

Методика проведения работы

1. Изменение (увеличение) расхода подаваемого насосом достигается путем плавного открытия регулировочного вентиля 3.

2. Величина расхода Q [$\text{м}^3/\text{с}$] определяется мерным способом при помощи мерного бака 9 и водомерной трубки 10 по формуле:

$$Q = \frac{W}{\Delta t}, [\text{м}^3/\text{с}] \quad (92)$$

где W – объем жидкости, вытекшей из трубопровода 7 в мерный бак 9 за время опыта, равное Δt секунд.

3. Для каждого замеренного расхода определяем значение средней скорости во всасывающем v_1 и v_2 отводящем трубопроводах по формулам:

$$V_1 = \frac{Q}{\omega_1}, [\text{м/с}] \quad (93)$$

$$V_2 = \frac{Q}{\omega_2}, [\text{м/с}] \quad (94)$$

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

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} [\text{м}^2] \text{ – площадь живого сечения во всасывающем трубопроводе}$$

диаметром $d_1 = 2$;

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} [\text{м}^2] \text{ – то же для отводящего трубопровода диаметром } d_2 = 1.$$

4. Полный напор насоса в опыте определяется по следующему уравнению:

$$H = \left(\frac{P_m}{\gamma} + \frac{P_e}{\gamma} \right) + (z_m + z_e) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}, [\text{м.вод.ст.}] \quad (95)$$

где: $\frac{P_m}{\gamma}$ – показания манометра 6 в метрах водяного столба, м.вод.ст.;

$\frac{P_e}{\gamma}$ – показания манометра вакуумметра 4 в метрах водяного столба, м.вод.ст.;

$(z_m - z_e)$ – расстояние по вертикали между точками присоединений вакуумметра 4 и манометра 6.

5. Полезная мощность насоса в опыте определится по формуле:

$$N = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (96)$$

где $\gamma = 9810 \text{ Н/м}^3$ – удельная масса воды.

6. Мощность на воду насосов определить по формуле:

$$N_g = I \cdot U \cdot \eta_{эл} \cdot \cos \varphi \quad (97)$$

где I – показания амперметра

U – показания вольтметра

$$\eta_{эл} = 83\% ; \cos \varphi = 0,88$$

7. Измеренные в каждом опыте величины заносятся в таблицу экспериментальных данных.

8. По данным опытов, указанных в таблице 7.1. строится график $H=f(Q)$, $N=f(Q)$, $\eta=f(Q)$, – характеристика исследованного центробежного насоса.

Таблица 7.1 – Экспериментальные данные для построения характеристики Ц/Б насоса.

№	Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Данные опытов		
				1	2	3
1	Показания манометров	M	м.вод.ст.			
2	Показания вакуумметра	B	м.вод.ст.			
3	Время опыта	t	с			
4	Объем жидкости, поступившей за время опыта	W	м ³			
5	Показания амперметра	I,	A			
6	Показания вольтметра	U	B			
7	Напор насоса	H	м.вод.ст.			
8	Производительность насоса	Q	м ³ /с			
9	Полезная мощность насоса	N	Bт			
10	Мощность на валу насоса	N _в	Bт			
11	КПД насоса, $\eta = \frac{N}{N_e} \cdot 100$	η	%			

Контрольные вопросы

1. Устройство лабораторного стенда?
2. Как определить полный напор насоса?
3. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости, его применение к решению различных технических задач?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика : учебник / Д. В. Штеренлихт. — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 656 с. — ISBN 978-5-8114-1892-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/212051>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Моргунов, К. П. Гидравлика : учебник / К. П. Моргунов. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-1735-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/211682>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Вольвак, С.Ф. Гидравлика : 2019-08-27 / С.Ф. Вольвак. — Белгород : БелГСХА им. В.Я. Горина, 2018 — Часть 1 : Гидравлика и гидравлические машины — 2018. — 240 с. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/123369>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Вольвак, С.Ф. Гидравлика : 2019-08-27 / С.Ф. Вольвак. — Белгород : БелГСХА им. В.Я. Горина, 2018 — Часть 2 : Гидромеханизация сельскохозяйственных процессов — 2018. — 198 с. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/123370>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Составители: Диденко Александр Александрович
Христенко Александр Геннадьевич
Пшенов Евгений Александрович

ГИДРАВЛИКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов обучающихся по направлениям подготовки: 35.03.06 Агроинженерия, 23.03.01 Технология транспортных процессов, 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), 20.03.02 Природообустройство и водопользование

Компьютерная верстка А.А. Диденко

Подписано к печати «___» _____ 2023

Формат 60x84/16

Объем 1,2 уч.- изд.л. тираж 100 экз.

Изд. № Заказ №

Отпечатано в мини-типографии Инженерного института НГАУ 630039, г.
Новосибирск. ул. Никитина. 147. ауд. 209