



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

Колледж СамГТУ

Якупова Г.И.

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ, ТЕПЛОТЕХНИКИ И АЭРОДИНАМИКИ

*Методические указания к
лабораторным работам*

Самара
Самарский государственный технический университет
2024

Печатается по решению методической комиссии Колледжа СамГТУ (протокол № 3 от 22.11.2024 г.).

Составитель: Якупова Г.И.

Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики : методические указания к лабораторным работам для студентов СПО / Якупова Г.И. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. – 39 с.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности среднего профессионального образования 08.02.13 Монтаж и эксплуатация внутренних сантехнических устройств, кондиционирования воздуха и вентиляции.

Методические указания включают в себя комплект методических материалов, необходимых для успешной подготовки и участия в проведении лабораторных работ по междисциплинарному курсу Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики студентам СПО: методические указания для обучающихся по освоению междисциплинарного курса, планы лабораторных работ, перечень вопросов к экзамену, библиографический список.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение	5
2.	Лабораторная работа 1. Изучение основных физических свойств жидкостей.	6
3.	Лабораторная работа 2. Изучение приборов для измерения давления.	13
4.	Лабораторная работа 3. Изучение способов измерения гидростатического давления	21
5.	Лабораторная работа 4. Уравнение Бернулли для установившегося движения.	25
6.	Лабораторная работа 5. Изучение режимов движения жидкостей.	30
7.	Лабораторная работа 6. Изучение потерь напора по длине.	32
8.	Лабораторная работа 7. Изучение местных потерь напора.	35
9.	Лабораторная работа 8. Изучение истечения жидкости через отверстия и насадки.	37

ВВЕДЕНИЕ

К выполнению лабораторных работ студент допускается после изучения основных теоретических положений и методики проведения эксперимента. Работы выполняются бригадами в составе 3–4 человек. После выполнения работы ее оформляют и защищают до начала следующей работы.

Защита лабораторных работ осуществляется каждым студентом самостоятельно. Оценка полученных студентом практических навыков выполняется по экспериментальной части опыта, а теоретических знаний – по ответам на контрольные вопросы, которые приведены в конце каждой лабораторной работы.

Отчет должен быть оформлен в соответствии с требованиями ЕСКД на листах формата А4 (297х210) и включать: титульный лист; цель работы; основные теоретические положения; схемы опытных установок или приборов; результаты опытов и расчетов, сведенные в таблицы; графические зависимости и выводы по результатам опытов; контрольные вопросы и ответы на них.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Цель работы: ознакомиться с методикой измерения плотности жидкости, расчета коэффициента температурного расширения, коэффициента вязкости жидкости и коэффициента поверхностного натяжения.

1.1. Общие сведения

Жидкостью называют физическое тело, обладающее большой подвижностью частиц и изменяющее свою форму под действием весьма малых сил. Основные физические свойства жидкости – плотность, сжимаемость, температурное расширение, вязкость и поверхностное натяжение. Все физические свойства жидкости зависят от температуры T , °С, и от давления p .

Плотность жидкости – это отношение массы жидкости к занимаемому объему:

$$\rho = \frac{m}{V}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]. \quad (1.1)$$

Плотность жидкости зависит от температуры и давления $\rho = f(T^\circ; p)$. С увеличением температуры плотность жидкости уменьшается. С увеличением давления – увеличивается. У воды максимальное значение плотности при -4°C . С уменьшением температуры воды от 4°C до 0°C плотность воды уменьшается.

Плотность жидкости можно определить с помощью специального прибора *ареометра*.

Сжимаемость жидкости – это способность жидкости изменять свой объем при изменении действующего на нее давления.

Температурное (тепловое) расширение – это способность жидкости изменять свой объем при изменении температуры. Его можно оценить с помощью коэффициента температурного расширения, представляющего собой относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на один градус

Вязкость – это свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу или скольжению сопротивляющихся слоев.

Вязкость характеризует степень текучести жидкости и подвижности ее частиц.

Единицей измерения динамической вязкости в системе СИ является (Па·с = нс/м²).

При выполнении технических расчетов обычно для оценки вязких свойств жидкости используют кинематический коэффициент вязкости ν , представляющий отношение динамической вязкости к ее плотности:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.7)$$

Единицей измерения кинематической вязкости в системе СИ является $\text{м}^2/\text{с}$.

Иногда используют производную от единицы измерения кинематической вязкости, называемую стоксом ($1 \text{ ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$).

Вязкость зависит от рода жидкости, ее температуры и давления и не зависит от скорости течения жидкости.

С увеличением температуры вязкость капельных жидкостей и их смесей уменьшается, а газообразных – увеличивается. Зависимость вязкости от температуры для разных жидкостей различна, и выразить эту зависимость аналитически общим уравнением не представляется возможным, где t° – температура воды, $^\circ\text{C}$.

Для минеральных масел, применяемых в гидроприводах машин, в интервале температур $30 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$, пользуются выражением:

$$\nu_T = \nu_{50} \left(\frac{50}{T} \right)^N$$

где ν_t и ν_{50} – кинематическая вязкость соответственно при данной $T \text{ }^\circ\text{C}$ и при $50 \text{ }^\circ\text{C}$; N – показатель степени, зависящий от исходной вязкости при $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значения N представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения показателя степени N в уравнении (1.9)

$\nu_{50} \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	2,8	6,25	9,00	11,8	21,2	37,4	45,1	52,9	60,6	80
N	1,38	1,59	1,72	1,79	1,99	2,13	2,24	2,32	2,49	2,56

С увеличением давления вязкость жидкостей возрастает, однако эта зависимость существенно проявляется лишь при относительно больших изменениях давления (в несколько десятков МПа).

Для измерения вязкости пользуются приборами, называемыми *вискозиметрами*. Существуют различные типы вискозиметров, которыми определяют вязкость, – вискозиметр Стокса, капиллярный вискозиметр, вискозиметр Энглера и др.

Поверхностное натяжение – свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул. Это свойство характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ , численно равным силе, действующей на единицу длины контура поверхности в сторону ее сокращения. Измеряется коэффициент поверхностного натяжения σ в единицах силы, отнесенной к длине, т.е. в Н/м.

Определить коэффициент поверхностного натяжения можно с помощью прибора *сталагмометра*.

Таблица 1.2

**Значения плотности, коэффициентов сжатия, температурного расширения, кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения
при $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$**

Наименование жидкости	ρ , кг/м^3	$\beta_p \cdot 10^{-3}$, МПа^{-1}	$\beta_t \cdot 10^{-3}$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\nu \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2/\text{с}$	$\sigma \cdot 10^{-3}$, Н/м
Вода пресная	998	0,49	0,208	1,01	73
Спирт этиловый	790	0,78	1,10	1,52	23
Масло моторное М-10	900	0,60	0,64	300	25
Масло промышленное И-20	900	0,72	0,73	110	25
Масло трансформаторное	890	0,60	0,70	30	25
Масло для гидравлических систем АМГ-10	850	0,76	0,83	20	25

1.2. Описание опытного устройства

Устройство № 1 для изучения физических свойств жидкости содержит 5 приборов, выполненных в общем прозрачном корпусе (рис. 1.1), на котором указаны параметры приборов, необходимые для обработки опытных данных. Приборы 3–5 начинают действовать при перевертывании устройства. Термометр 1 показывает температуру окружающей среды и, следовательно, температуру жидкостей во всех устройствах.

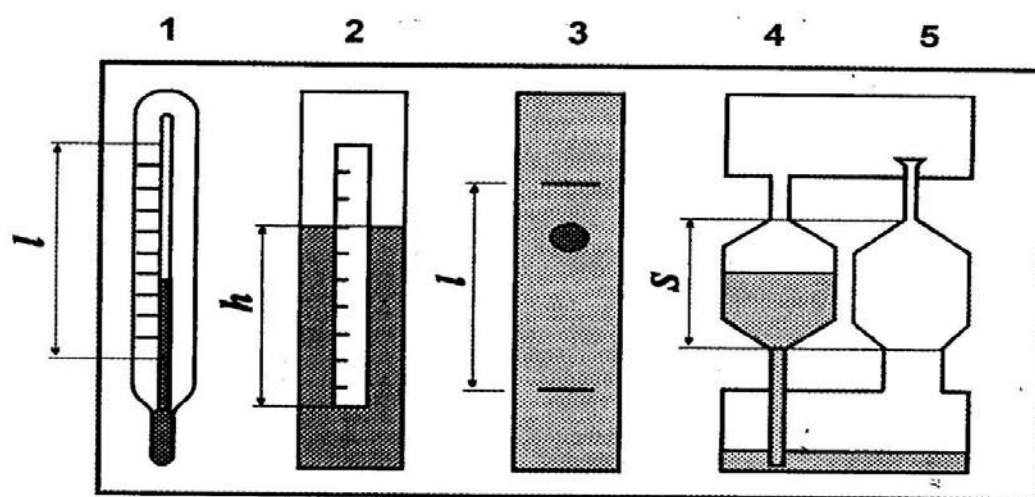


Рис. 1.1. Схема устройства № 1 для определения физических свойств жидкости: 1 – термометр; 2 – ареометр; 3 – вискозиметр Стокса; 4 – капиллярный вискозиметр; 5 – стагмометр

1.3. Задание

При выполнении работы необходимо:

- экспериментально определить плотность ρ воды ареометром;

- экспериментально определить коэффициент температурного расширения β_t спирта спомощью спиртового термометра;
- экспериментально определить кинематическую ν и динамическую μ вязкость моторного масла М-10 вискозиметром Стокса и капиллярным вискозиметром;
- экспериментально определить коэффициент поверхностного натяжения σ моторного масла М-10 сталагмометром;
- сравнить опытные значения полученных величин со справочными значениями.

1.3. Методика и порядок проведения испытаний, обработка результатов

Измерение плотности жидкости ареометром

Ареометр 2 служит для определения плотности жидкости поплавковым методом и представляет собой пустотелый цилиндр с миллиметровой шкалой и грузом в нижней части. Благодаря грузу ареометр плавает в исследуемой жидкости в вертикальном положении. Глубина погружения ареометра является мерой плотности жидкости и считывается со шкалы по верхнему краю мениска жидкости вокруг ареометра. В обычных ареометрах шкала отградуирована сразу по плотности.

В процессе работы следует:

1) измерить глубину погружения h воды на ареометре по миллиметровой шкале на нем;

2) вычислить плотность воды по формуле: $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ (1.10), где m и d –

масса и диаметр ареометра. Формула (1.10) получена путем приравнивания силы тяжести ареометра $G = mg$ и выталкивающей (архимедовой) силы $P_{арх} = \rho g W$, где W – объем погруженной части ареометра и $W = (\pi d^2 / 4) h$;

3) вычислить плотность воды по формуле:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta_T \Delta T^o}, \quad (1.11)$$

где β_T – коэффициент температурного расширения; ρ_0 – плотность жидкости, соответствующая ее начальной температуре; ΔT^o – разность температур ($T^o - T^o$);

4) значения используемых и полученных величин занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Значения используемых и полученных величин при определении плотности жидкости ареометром

Наименование жидкости	T, °C	m, г	d, см	h, см	ρ , кг/м ³	ρ_{t0} , кг/м ³	ρ^* , кг/м ³
Вода							

ρ^*_{T0} – плотность жидкости, посчитанная по уравнению (1.11) и соответствующая измеренной температуре T °C; ρ^* – справочное значение плотности жидкости (табл. 1).

Определение коэффициента температурного расширения

Для определения коэффициента температурного расширения жидкости используется термометр 1 (рис. 1.1), который представляет собой стеклянный баллон с капилляром, заполненным термометрической жидкостью (в данном случае спиртом). Термометр имеет шкалу. Принцип действия термометра основан на тепловом расширении жидкости. Изменение температуры окружающей среды приводит к соответствующему изменению объема термометрической жидкости и ее уровня в капилляре. Уровень жидкости указывает на шкале значение температуры.

Коэффициент температурного расширения термометрической жидкости определяется на основе предположения, что температура окружающей среды повысилась от нижнего (нулевого) до верхнего предельного значения термометра и уровень жидкости в капилляре возрос на величину l .

В процессе работы следует:

- 1) подсчитать общее число градусных делений ΔT в шкале термометра и измерить расстояние l между крайними штрихами шкалы;
- 2) вычислить приращение объема термометрической жидкости $\Delta W = (\pi d^2/4)l$, где d – диаметр капилляра термометра;
- 3) с учетом начального (при 0 °C) объема термометрической жидкости W найти значение коэффициента температурного расширения V_T . Значения используемых и вычисленных величин занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Значения используемых и вычисленных величин при определении коэффициента температурного расширения

Наименование жидкости	$T, ^\circ\text{C}$	$d \cdot 10^{-2},$ м	$W \cdot 10^{-6},$ м ³	$\Delta T,$ °C	$l \cdot 10^{-2},$ м	$\Delta W \cdot 10^{-6},$ м ³	$V_T \cdot 10^{-3}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$V^* \cdot 10^{-3}, ^\circ\text{C}^{-1}$
Спирт								

1.4.1. Определение вязкости вискозиметром Стокса

Вискозиметр Стокса 3 (рис. 1.1) представляет собой цилиндрическую емкость, заполненную испытуемой жидкостью. В эту жидкость помещен шарик. Прибор позволяет определить вязкость жидкости по времени падения шарика в нем.

В процессе работы следует:

- 1) повернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на 180° и зафиксировать секундомером время t прохождения шариком расстояния l между двумя метками в приборе 3. Шарик должен падать по оси емкости без соприкосновения со стенками, т.е. прибор 3 должен стоять строго вертикально.

Опыт выполнить три раза, а затем определить среднеарифметическое значение времени t ;

2) вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости жидкости по эмпирическому уравнению:

$$\nu = \frac{gd^2t\left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1\right)}{\left[18l + 43,2l\left(\frac{d}{D}\right)\right]}$$

где d и D – диаметры шарика и цилиндрической емкости, ρ и $\rho_{\text{ш}}$ – плотности жидкости и материала шарика;

3) вычислить опытное значение динамического коэффициента вязкости μ , используя зависимость (1.7);

4) значения используемых для расчета и определяемых величин занести в табл. 1.5.

Таблица 1.5

**Значения используемых для расчета величин при определении
вязкости вискозиметром Стокса**

Наименование жидкости	T °C	ρ , кг/м ³	t , с	$l \cdot 10^{-2}$, м	$d \cdot 10^{-2}$, м	$D \cdot 10^{-2}$, м	$\rho_{\text{ш}}$, кг/м ³	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	μ , Па·с	$\nu^* \cdot 10^{-6}$, м ² /с	μ^* , Па·с
Масло моторное М-10											

1.4.2. Измерение вязкости капиллярным вискозиметром

Капиллярный вискозиметр 4 (рис. 1.1) включает емкость с капилляром. Вязкость определяется по времени истечения испытуемой жидкости из емкости через капилляр.

В процессе работы следует:

1) перевернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на 180° и определить секундомером время t истечения через капилляр объема жидкости между метками (высотой S) из емкости вискозиметра 4 и температуру T° , С, по термометру 1;

2) вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости по уравнению:

$$\nu = M \cdot t, \quad (1.13)$$

где M – постоянная вискозиметра;

3) вычислить опытное значение динамического коэффициента вязкости μ испытуемой жидкости;

4) значения используемых для расчета и определяемых величин занести в табл. 1.6.

Таблица 1.6

**Значения используемых для расчета величин
при определении вязкости капиллярным вискозиметром**

Наименование жидкости	T, °C	M, м ² /с ²	t, с	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	μ , Па·с	$\nu^* \cdot 10^{-6}$, м ² /с	μ^* , Па·с
Моторное масло М-10							

Значение ν^* принимается по табл. 1.2.

**1.4.3. Определение коэффициента поверхностного натяжения
сталагмометром**

Сталагмометр 5 (рис. 1.1) включает емкость с капилляром, расширенным на конце для накопления жидкости в виде капли. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости сталагмометром осуществляется методом отрыва капель. Сила поверхностного натяжения в момент отрыва капли равна ее весу (силе тяжести) и определяется по плотности жидкости и числу капель, полученному при опорожнении емкости с заданным объемом.

В процессе работы следует:

перевернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на 180° и подсчитать число капель, получаемых в сталагмометре 5 из объема высотой S между двумя метками. Опыт повторить три раза и вычислить среднее арифметическое значение числа капель n ;

1) найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения σ по формуле:

$$\sigma = \frac{K \cdot \rho}{n}, \quad (1.14)$$

где K – постоянная сталагмометра;

2) значения используемых для расчета и определяемых величин занести в табл. 1.7;

Таблица 1.7

**Значения используемых для расчета величин
при определении коэффициента поверхностного натяжения
сталагмометром**

Наименование жидкости	T, °C	ρ , кг/м ³	K, м ³ /с	n	$\sigma \cdot 10^{-3}$, Н/м	$\sigma^* \cdot 10^{-3}$, Н/м
Масло моторное М-10						

Значение σ^* принимается по табл. 1.2.

3)

П

о результатам проведенных испытаний сделать соответствующие выводы.

1. Что понимают под плотностью жидкости? Каковы единицы ее измерения? От чего и как зависит плотность жидкости?
2. Чему равна плотность воды при температуре 4 °C?
3. Как определить плотность жидкости при заданной температуре?
4. Как называется прибор для определения плотности жидкости?
5. Что понимают под сжимаемостью жидкости? Как оценивается способность жидкости к сжатию?
6. Что такое модуль объемной упругости жидкости, в каких единицах он измеряется и от чего и как зависит?
7. Что понимают под температурным расширением жидкости? Как оценивается способность жидкости к расширению?
8. Что понимают под коэффициентом температурного расширения, в каких единицах он измеряется, от чего и как зависит?
9. Как определить коэффициент температурного расширения?
10. Что называют вязкостью жидкости?
11. Как формулируется и записывается закон жидкостного трения Ньютона?
12. В каких вопросах гидравлики используются знания о вязкости жидкости?
13. Что называется касательным напряжением и как его определить?
14. Каков физический смысл динамического коэффициента вязкости жидкости?
15. Какова размерность динамического коэффициента вязкости?
16. Каков смысл кинематического коэффициента вязкости и какова его размерность?
17. Какова связь между динамическим и кинематическим коэффициентами вязкости?
18. От чего и как зависит вязкость жидкости?
19. Какую жидкость называют «идеальной»? Для чего введено понятие «идеальной» жидкости?
20. Как называется прибор для определения вязкости жидкости?
21. Каково устройство вискозиметра Стокса?
22. Каково устройство капиллярного вискозиметра?
23. Каков принцип определения вязкости жидкости вискозиметром Стокса?
24. Каков принцип определения вязкости капиллярным вискозиметром?
25. Что понимают под коэффициентом поверхностного натяжения и в каких единицах он измеряется?
26. От чего и как зависит коэффициент поверхностного натяжения?
27. Как называется прибор для измерения коэффициента поверхностного натяжения и как он устроен?
28. Каков принцип определения коэффициента поверхностного натяжения?

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия приборов для измерения давления.

2.1. Общие сведения

Гидростатическим давлением называется предел отношения силы давления к площадке, на которую действует эта сила, и при стремлении этой площадки к нулю или точке, т.е.

$$P = \lim \left(\frac{P}{W} \right)$$

где w – величина некоторой площадки внутри жидкости или на ее поверхности; P – сила давления жидкости на площадку w .

Гидростатическое давление является нормальным сжимающим напряжением в неподвижной жидкости.

Различают следующие виды давления: абсолютное (полное), весовое (избыточное), манометрическое, вакуумметрическое, барометрическое.

Для жидкости, находящейся в поле силы тяжести, *абсолютное гидростатическое давление* в рассматриваемой точке жидкости, находящейся на глубине h от свободной поверхности или от уровня с известным давлением, рассчитывается по формуле:

$$p = p_0 + \rho gh, (2.2)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности или на известном уровне; в частных случаях p_0 может равняться атмосферному давлению ($p_0 = p_{ат}$), либо быть больше атмосферного давления ($p_0 > p_{ат}$), либо быть меньше атмосферного давления ($p_0 < p_{ат}$).

Величина ρgh в уравнении (2.2) называется *весовым*, или *избыточным*, *давлением* (избыток над величиной p_0):

$$p_{изб} = \rho gh (2.3)$$

Величина превышения абсолютного давления над атмосферным называется *манометрическим давлением*:

$$p_{ман} = p - p_{ат}. (2.4)$$

Величина давления, недостающая до атмосферного, называется *вакуумметрическим давлением*:

$$p_{вак} = p_{ат} - p. (2.5)$$

Вакуумметрическое давление имеет место, если абсолютное давление в точке покоящейся жидкости меньше атмосферного давления. Предел измерения вакуумметрического давления – от 0 до 1 ат.

Барометрическое, или *атмосферное*, *давление* – это давление воздуха, которое зависит от высоты места над уровнем моря и от погоды.

Значения атмосферного (барометрического) давления в зависимости от высоты над уровнем моря

Высота над уровнем моря, м	0	100	500	1000	2000	3000
Давление $p_{ат}$, кПа	101,3	100	95,1	90,2	79,4	72,3

Для измерения давления в жидкости используют приборы, которые по принципу действия подразделяются на жидкостные, механические и электрические.

В зависимости от вида измеряемого давления (абсолютного, избыточного, манометрического, вакуумметрического, барометрического) *жидкостные* приборы делятся на пьезометры, манометры, вакуумметры, дифференциальные манометры, барометры.

Жидкостные приборы исторически стали применяться первыми. В 1642 г. итальянским ученым Э. Торричелли впервые было измерено атмосферное давление ртутным барометром, состоящим из вертикальной стеклянной трубки с миллиметровой шкалой и закрытым верхним концом. Трубка заполнена ртутью и опущена нижним концом в чашу с ртутью.

Жидкостные приборы применяют для измерения небольших давлений (до $1,5 \text{ кг/см}^2$). Они имеют простую конструкцию, достаточно высокую точность, применяются как в лабораторной практике, так и в технике. Действие жидкостных приборов основано на принципе уравнивания измеряемого давления весом столба жидкости высотой h в приборе.

Самым простейшим жидкостным прибором является пьезометр, представляющий собой прямую стеклянную трубку диаметром $1,0...1,5 \text{ см}$, нижний конец которой присоединяется к отверстию в стенке сосуда на уровне, необходимом для измерения давления, а верхний конец остается открытым (рис. 2.1).

Манометрическое давление, измеряемое пьезометром (рис. 2.1), вычисляется по формуле:

$$p_{ман} = \rho g h_p, \quad (2.6)$$

где h_p – высота столба жидкости в пьезометре.

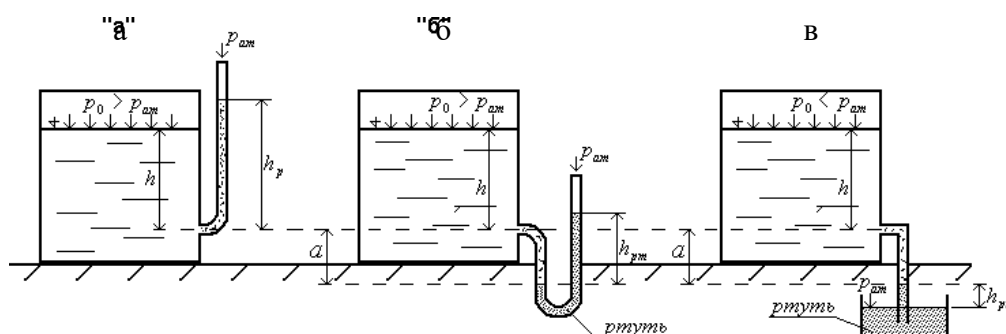


Рис. 2.1. Схемы жидкостных приборов: а) пьезометр; б) v-образный ртутный манометр; в) вакуумметр

Если в резервуаре $p_0 = p_{ат}$, то высота столба жидкости в пьезометре будет

равна глубине, на которой измеряется давление ($h_p = h$).

Для измерения манометрического давления в жидкости часто применяют U-образный манометр, один конец которого открыт, а второй присоединяется к точке, в которой измеряется давление (рис 2.1б). Чаще всего рабочей жидкостью U-образного манометра является ртуть, что увеличивает диапазон измеряемого давления.

Давление в точке присоединения U-образного ртутного манометра определяется по уравнению:

$$p_{\text{ман}} = (\rho_{\text{рт}} h_{\text{рт}} - \rho a)g, \quad (2.7)$$

где $\rho_{\text{рт}}$ и ρ – соответственно плотность ртути и жидкости, в которой измеряется давление; $h_{\text{рт}}$ – разность уровней ртути в коленях манометра; a – расстояние от точки присоединения манометра к резервуару до уровня ртути в левом колене манометра.

В качестве жидкостного вакуумметра может служить U-образный ртутный манометр или обратный пьезометр.

Если абсолютное давление в резервуаре в точке присоединения манометра меньше атмосферного, то уровень ртути в правом колене манометра ниже уровня в левом колене на высоту $h_{\text{рт}}$ (рис. 2.2а).

Вакуумметрическое давление в точке присоединения U-образного ртутного устройства определяется по уравнению:

$$p_{\text{вак}} = (\rho_{\text{рт}} h_{\text{рт}} + \rho a)g. \quad (2.8)$$

На (рис. 2.2б) изображен обратный пьезометр, открытый конец которого опущен в чашку с ртутью. Вакуумметрическое давление в точке А определяется по уравнению (2.8).

а

б

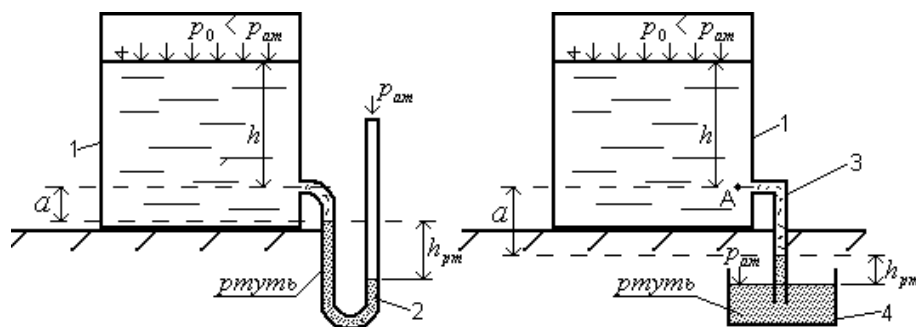


Рис.

2.2. Жидкостные вакуумметры: а) ртутный U-образный; б) обратный пьезометр; 1 – резервуар с жидкостью; 2 – U-образное колено, заполненное ртутью; 3 – обратный пьезометр (жидкостный вакуумметр); 4 – чашка с ртутью

Механические приборы для измерения давления делятся на манометры, вакуумметры и мановакуумметры.

В механических приборах измеряемое давление вызывает деформацию чувствительного (упругого) элемента (трубка, мембрана, сильфон), которая с помощью специальных механизмов передается на указатель давления (стрелку), перемещая ее по проградуированной шкале.

Механические приборы компактны. Механические манометры

применяются для измерения высоких давлений. Принципиальная схема механического прибора для измерения давления представлена на рис. 2.3.

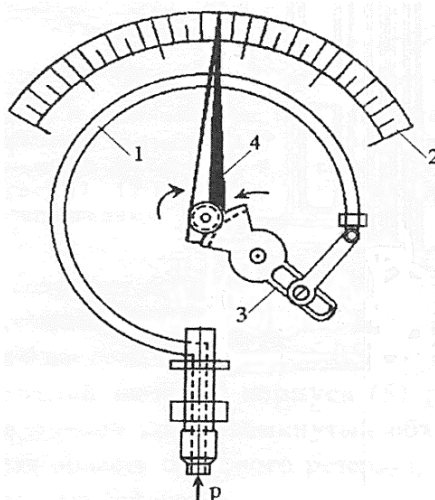


Рис. 2.3. Механический манометр: 1 – чувствительный элемент (трубка Бурдона); 2 – шкала; 3 – передаточный механизм; 4 – стрелка. Жесткость чувствительного элемента подбирают в соответствии с максимальным давлением, на которое рассчитан данный манометр.

В электрических приборах воспринимаемое чувствительным элементом давление преобразуется в электрический сигнал. Сигнал регистрируется показывающим (вольтметр, амперметр) или пишущим (самописец, осциллограф) приборами.

2.2. Описание опытного устройства

Устройство № 2 для определения давления выполнено прозрачным и имеет полость 1, в которой всегда сохраняется атмосферное давление, и резервуар 2, частично заполненный водой (рис. 2.4а). Для измерения давления и уровня жидкости в резервуаре 2 служат жидкостные приборы 3, 4 и 5. Они представляют собой прозрачные вертикальные каналы со шкалами, размеченными в единицах длины.

Пьезометр 3 сообщается верхним концом с атмосферой, нижним – с резервуаром 2. С помощью пьезометра 3 можно определить весовое (манометрическое) давление на дно резервуара 2.

Уровнемер 4 соединен обоими концами с резервуаром 2 и служит для измерения уровня жидкости Н в нем.

Мановакуумметр 5 представляет собой U-образный канал, частично заполненный жидкостью. Левым коленом он подключен к резервуару 2, а правым – к полости 1 и предназначен для определения манометрического (рис. 2.4а) или вакуумметрического (рис. 2.4б) давлений над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2. Давление в резервуаре 2 можно изменять путем наклона устройства № 2.

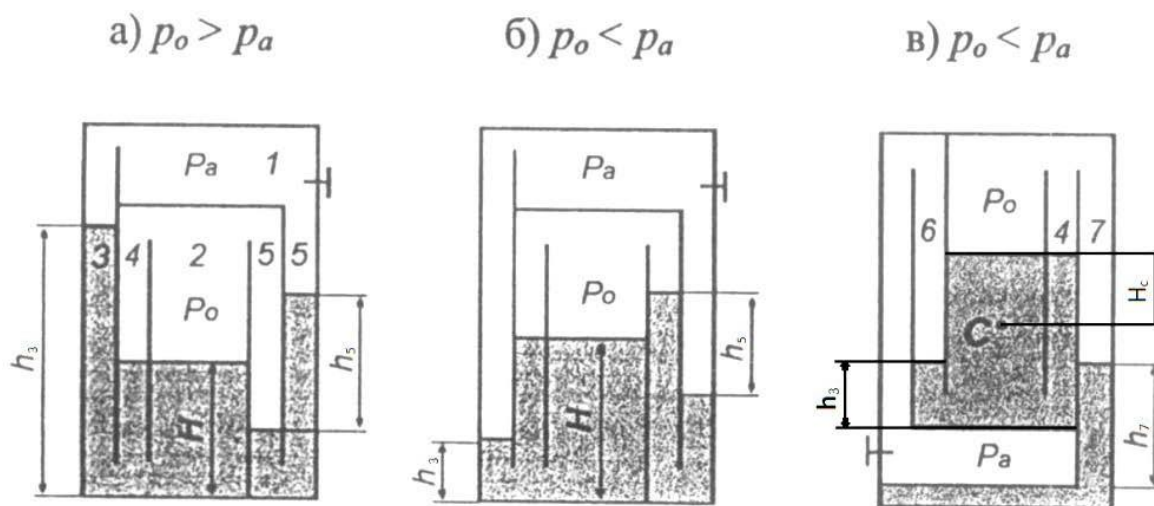


Рис. 2.4. Схема устройства № 2: 1 – полость с атмосферным давлением; 2 – опытный резервуар; 3, 6 – пьезометры; 4 – уровнемер; 5 – мановакуумметр; 7 – вакуумметр

При повороте устройства № 2 в вертикальной плоскости на 180° против часовой стрелки (рис. 2.4в) канал 4 остается уровнемером, колено мановакуумметра 5 преобразуется в пьезометр 6, а пьезометр 3 – в вакуумметр (обратный пьезометр) 7, служащий для определения вакуума над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2.

2.3. Задание

Определить абсолютное давление на дне резервуара 2 при $p_0 > p_{ат}$;

Определить абсолютное давление p_0 над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 при $p_0 > p_{ат}$;

Определить абсолютное давление p_0 над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 при $p_0 < p_{ат}$;

Определить давление в заданной преподавателем точке С.

2.4. Методика и порядок проведения испытаний

Для определения абсолютного давления p на дне резервуара 2 и абсолютного давления p_0 в резервуаре 2 над жидкостью вначале следует создать давление над свободной поверхностью жидкости выше атмосферного ($p_0 > p_{ат}$). Для этого устройство № 2 поставить на правый бок, а затем поворотом его против часовой стрелки отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 5 в резервуар 2. При этом уровень жидкости в пьезометре 3 станет выше уровня жидкости в резервуаре 2, а уровень жидкости в левом колена мановакуумметра 5 – ниже уровня жидкости в его правом колена. Снять показания пьезометра 3 – h_3 , уровнемера 4

– Н и мановакуумметра 5 – h_5 (рис. 2.4а).

Для определения абсолютного давления p_0 над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 при $p_0 < p_{ат}$ вначале надо создать вакуум. Для этого устройство № 2 поставить на левый бок, а затем наклоном вправо отлить часть жидкости из резервуара 2 в левое колено мановакуумметра 5. При этом уровень

жидкости в пьезометре 3 должен стать ниже, чем в резервуаре 2, а на мановакуумметре 5 уровень жидкости в левом колене должен стать выше уровня жидкости в правом колене. Далее снять показания мановакуумметра 5 – h_5 , показания уровнемера 4 – H , пьезометра 3 – h_3 (рис. 2.4б).

Для определения давления в заданной преподавателем точке C следует устройство № 2 перевернуть против часовой стрелки на 180° (рис. 2.4в). Снять показания пьезометра 6 – h_6 , обратного пьезометра 7 – h_7 и уровнемера 4 – H .

2.5. Обработка результатов измерений

При $p_0 > p_{ат}$ (рис. 2.4а) абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра 3 определяют по известному уравнению гидростатики:

$$p = p_a + \rho gh_3, (2.9)$$

где p_a – атмосферное давление, Па; ρ – плотность воды, кг/м³.

Принять $p_a = 101\,325$ Па; $\rho = 998$ кг/м³.

Абсолютное давление p_0 в резервуаре 2 над жидкостью ($p_0 > p_{ат}$) определяется по уравнению:

$$p_0 = p_a - \rho gh_5. (2.10)$$

Для проверки абсолютное давление p^* на дне резервуара 2 определим через показания мановакуумметра 5 и уровнемера 4 по уравнению:

$$p^* = p_0 + \rho gH. (2.11)$$

Абсолютное давление p_0 в резервуаре 2 над свободной поверхностью жидкости при $p_0 < p_{ат}$ (рис. 2.4б) определим по уравнению:

$$p_0 = p_a - \rho gh_5. (2.12)$$

Давление в заданной преподавателем точке C , манометрическое или вакуумметрическое (рис. 2.4в), определяют по уравнению:

$$p_c = p_0' + \rho gH_c (2.13)$$

где H_c – глубина погружения точки C под свободной поверхностью жидкости.

При этом p_0 определим по уравнению:

$$p_0' = p_a + \rho gh_6 - \rho gH, (2.14)$$

где h_6 – показания пьезометра 6; H – показание уровнемера 4, либо по уравнению:

$$p_0' = p_a - \rho gh_7, (2.15)$$

где h_7 – показания обратного пьезометра (вакуумметра) 7.

После вычисления абсолютного давления на дне резервуара двумя способами ($p_0 > p_{ат}$) по уравнениям (2.9) и (2.11) для сопоставления результатов найти относительную погрешность измерений δp и выразить ее в процентах по формуле:

$$\delta_p = \frac{|p - p^*|}{p} \times 100\%. (2.16)$$

В процессе проведения опытов и обработки их результатов данные заносить в табл. 2.2.

Экспериментальные данные и значения определяемых величин

№ п/п	Наименование величины и ее размерность	Обозначение	Условия опыта	
			$p_0 > p_{ат}$	$p_0 < p_{ат}$
1.	Уровень жидкости в резервуаре, м	$H \cdot 10^{-2}$		
2.	Пьезометрическая высота в пьезометре 3, м	$h_3 \cdot 10^{-2}$		
3.	Показания мановакуумметра 5, м	$h_5 \cdot 10^{-2}$		—
4.	Абсолютное давление на дне резервуара 2 по уравнению (2.9), Па	p		—
5.	Абсолютное давление в резервуаре 2 над жидкостью, Па	p_0		
6.	Абсолютное давление на дне резервуара 2 по уравнению (2.11)	P^*		—
7.	Глубина точки С под свободной поверхностью жидкости, м	$H_c \cdot 10^{-2}$	—	
8.	Показания пьезометра 6, м	$h_6 \cdot 10^{-2}$		
9.	Показания уровнемера 4, м	$H \cdot 10^{-2}$		
10.	Показания обратного пьезометра 7, м (вакуумметра)	$h_7 \cdot 10^{-2}$		
11.	Абсолютное давление над свободной поверхностью жидкости по уравнению (2.14), Па	p'	—	
12.	Абсолютное давление над свободной поверхностью жидкости по уравнению (2.15), Па	p_0	—	
13.	Абсолютное давление в точке С с учетом уравнения (2.14), Па	p_c	—	
14.	Абсолютное давление в точке С с учетом уравнения (2.15), Па	P^*	—	
15.	Относительная погрешность результатов определения давления на дне резервуара, %	δp		—

Контрольные вопросы

1. Что понимают под гидростатическим давлением?
2. Каковы единицы измерения гидростатического давления в международной СИ?
3. Каков закон распределения гидростатического давления по глубине?
4. Каковы основные виды гидростатического давления?
5. Что понимают под абсолютным давлением?
6. Что понимают под манометрическим давлением?
7. Какое давление называют вакуумметрическим?
8. Какое давление называют барометрическим?
9. Что называют паскалем?

10. Что больше: абсолютное давление, равное 0,16 МПа, или избыточное, равное 0,07 МПа?
11. Что понимают под пьезометрическим напором?
12. Какова связь между давлением и пьезометрической высотой?
13. Каковы достоинства и недостатки жидкостных приборов для измерения давления?
14. Каковы достоинства и недостатки механических приборов для измерения давления в жидкостях?
15. Пьезометр – что это?
16. Чему равен пьезометрический напор (в метрах водяного столба и миллиметрах ртутного столба) для давления, равного двум атмосферам?

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Задачи работы – получение практических навыков экспериментального определения гидростатического давления с помощью простейшего устройства, называемого пьезометром, а также навыков вычисления избыточного давления, вакуума, абсолютного давления в различных системах единиц измерения.

Описание экспериментальной установки

Для изучения способов измерения гидростатического давления на кафедре имеются две экспериментальные установки, имеющие разный принцип получения давления в замкнутой воздушной области.

Экспериментальная установка №3

Схема установки представлена на рис.1. Установка состоит из основного резервуара 1, резервуара 2 обратного пьезометра, ручного воздушного насоса 8 для создания избыточного давления, водоструйного насоса 9 для создания вакуума, запорных кранов 3-7, позволяющих управлять режимом работы установки, а также системы пьезометров для измерения давления в воздушной области основного резервуара и в точке А на его дне.

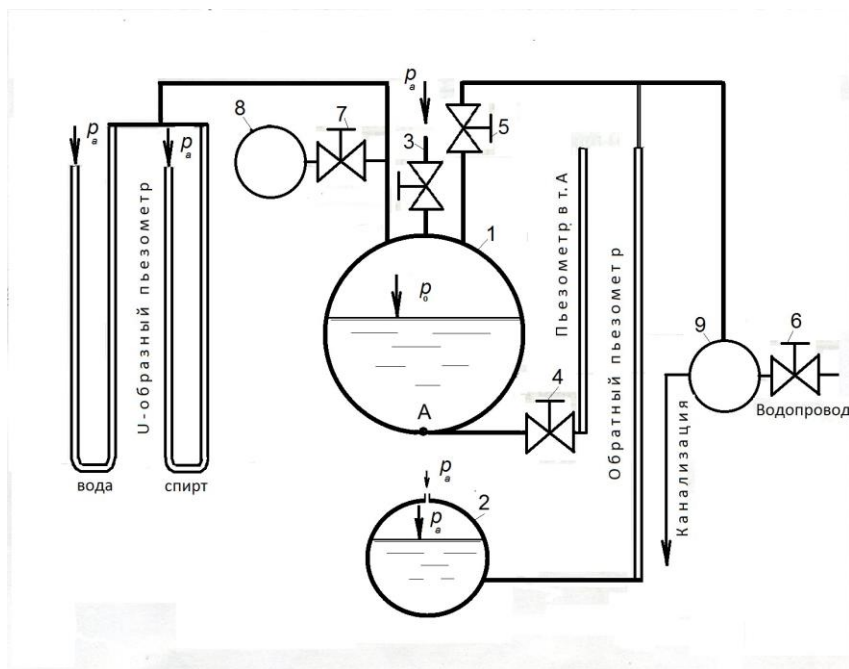


Рис.1

Экспериментальная установка №3

Схема установки представлена на рис. 2. Установка представляет собой закрытый неподвижный резервуар A , соединенный резиновой трубкой T_1 со стеклянным подвижным сосудом T_2 . В данной работе измеряется давление в воздушной области W резервуара A . Резервуар A и стеклянный сосуд T_2 частично заполнены водой, так что их можно рассматривать как два сообщающихся сосуда, в которых находится жидкость. Верхний конец сосуда T_2 открыт и выходит в атмосферу. Этот сосуд можно перемещать в вертикальном направлении, пользуясь системой блоков. При перемещении её вверх или вниз величина избыточного давления или вакуума в воздушной области резервуара A изменяется.

Для измерения давления в воздушной области служат два U -образных пьезометра Π_1 и Π_2 и обратный пьезометр Π_3 , смонтированные на одном щите Щ и снабженные шкалой Ш с сантиметровыми и миллиметровыми делениями. Все эти пьезометры одним концом соединены с воздушной областью W резервуара A , где должно измеряться давление, а другим концом непосредственно с атмосферой или с сосудом, где давление на поверхности равно атмосферному. Резервуар A может быть соединен с атмосферой, для чего необходимо открыть кран K_1 . Обратный пьезометр Π_3 отключают от резервуара A поворотом крана K_2 . Вдоль трубок пьезометров передвигается ползунок B с натянутой нитью. По этой нити делают отсчеты по шкале Ш .

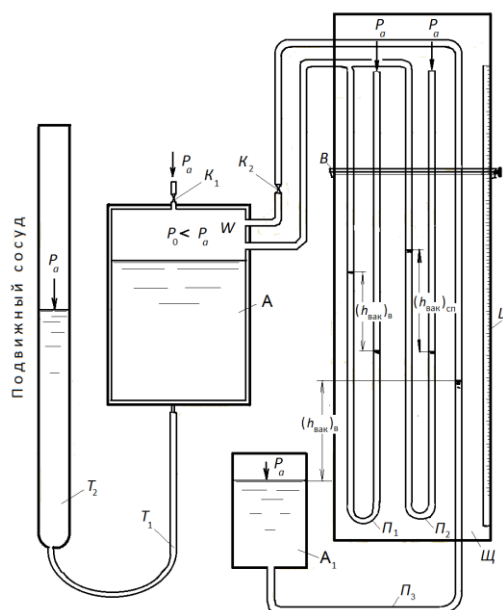


Рис.2

Содержание работы

1. Получение и определение избыточного давления в замкнутой воздушной области основного резервуара и в точке А (для установки №3) с помощью *U*-пьезометров. В одном пьезометре рабочей жидкостью является вода, в другом – спирт.

2. Получение и определение величины вакуума в замкнутой воздушной области с помощью *U*-образных пьезометров и обратного пьезометра. Вычисление абсолютного давления p_A в замкнутой воздушной области для случаев $p_A > p_a$ и $p_A < p_a$.

При выполнении работы опыты необходимо провести для трёх - пяти различных значений избыточного давления и трёх - пяти значений вакуума.

Порядок проведения опытов

На установке №3

Измерение избыточного давления

1. Закройте краны 5 и 6 системы создания вакуума, вращая их до упора по часовой стрелке.
2. Откройте кран 3 атмосферного давления, кран 7 воздушного насоса, и кран 4 пьезометра, установленного в т. А, вращая их до упора против часовой стрелки.
3. Снимите отсчет по шкале пьезометра, установленного в точке А, соответствующий атмосферному давлению в замкнутой области. Запишите отсчет

в соответствующую графу бланка отчета.

4. Закройте кран 3, изолируя замкнутую область резервуара от воздействия атмосферного давления.

5. Подкачайте воздушным насосом некоторый дополнительный объем воздуха в основной резервуар, при этом визуальным образом контролируйте уровни в пьезометрах. Уровни должны находиться в пределах соответствующих шкал.

6. Закройте кран 7 воздушного насоса и после стабилизации уровней в пьезометрах снимите отсчеты по шкале U -образных пьезометров и пьезометра в точке A .

Первый опыт закончен. Чтобы перейти ко второму и последующим опытам, измените давление в замкнутой области. Для этого на весьма короткое время плавно приоткройте и сразу закройте кран атмосферного давления 3, контролируя уровни жидкости в пьезометрах. После стабилизации уровней в пьезометрах снимите соответствующие отсчеты.

Измерение вакуума

1. Откройте кран 3 атмосферного давления и кран 5 системы создания вакуума в замкнутой области. Снимите отсчет по шкале обратного пьезометра, соответствующий атмосферному давлению.

2. Закройте краны 3, 4 и 7.

3. Приведите в действие струйный насос, постепенно открывая вентиль 6 и контролируя уровни жидкости в пьезометрах.

При достижении требуемых уровней в пьезометрах закройте вентиль 6.

4. Запишите в бланк отчета отсчеты по шкалам U -образных и обратного пьезометров.

Переход ко второму и последующим опытам осуществляется также как и при измерении избыточного давления, т.е. с помощью крана 3.

По окончании опытов откройте все краны, за исключением вентилей 6 струйного насоса.

На установке №2

Измерение избыточного давления

1. Откройте кран K_1 , трубку T_2 установите в самое нижнее положение.

2. Закройте краны K_1 и K_2 и поднимите трубку T_2 вверх на некоторую высоту (10-15 см); дождитесь установления уровней жидкости в трубке T_2 и в пьезометрах Π_1 и Π_2 .

3. Снимите отсчеты по шкале **III**, соответствующие горизонтам жидкости (воды и спирта) в левом и правом коленях **U**-образных пьезометров. При этом ползунок **B** с натянутой на нем нитью должен быть установлен так, чтобы нить касалась центра мениска жидкости, находящейся в пьезометрах **П₁** и **П₂** и совпадала со своим отражением в зеркале, помещенном за трубками пьезометров.

Первый опыт закончен. Чтобы перейти к следующему опыту, измените давление в замкнутой области. Для этого необходимо поднять трубку **T₂** вверх (краны **K₁** и **K₂** должны быть закрыты). Результаты всех измерений должны быть записаны в соответствующие графы бланка отчета.

Измерение вакуума

1. Откройте **K₁** и **K₂** и установите трубку **T₂** в самое верхнее положение. После установления уровней жидкости в трубке **T₂**, в области **W** и в пьезометрах, в замкнутой воздушной области установится атмосферное давление, и обратный пьезометр будет соединен с замкнутой воздушной областью.

2. Снимите отсчет по обратному пьезометру при атмосферном давлении.

3. Закройте кран **K₁**, опустите трубку **T₂** вниз и подождите пока уровни жидкости в трубке **T₂** и в пьезометрах установятся.

4. Снимите отсчеты по шкале **III**, соответствующие горизонтам жидкости (воды и спирта) в левом и правом коленях **U**-образных пьезометров и обратного пьезометра.

При переходе к следующим опытам необходимо только опускать трубку **T₂** вниз, при этом кран **K₁** должен быть закрыт, а кран **K₂** открыт.

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислите избыточное давление p_u в замкнутой воздушной области
2. Вычислите абсолютное давление в замкнутой воздушной области

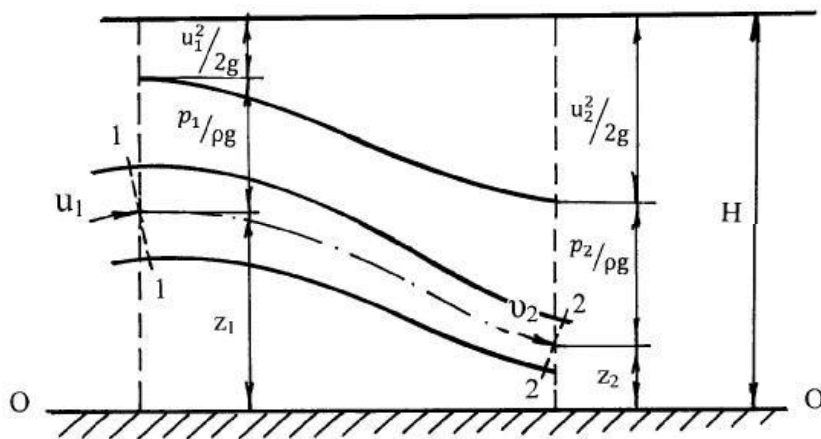
Лабораторная работа № 4

УРАВНЕНИЕ Д. БЕРНУЛЛИ ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ (вязкой несжимаемой жидкости)

Цель работы: изучить закон сохранения энергии жидкости (уравнение Д. Бернулли) и экспериментально определить составляющие и полную удельную энергию в различных сечениях напорного потока при установившемся движении реальной жидкости.

4.1. Общие сведения

В потоке жидкости выделим элементарную струйку и определим удельную энергию жидкости в двух произвольных сечениях 1-1 и 2-2 (рис. 3.4)



Графическая иллюстрация уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.

Любая частица жидкости обладает запасом полной удельной энергии E , которая складывается из удельной потенциальной энергии E_n и удельной кинетической энергии E_k : $E = E_n + E_k$.

Удельная потенциальная энергия частицы жидкости состоит из потенциальной энергии положения и энергии давления: $E_n = z + \frac{\rho}{\gamma}$,

где z – удельная потенциальная энергия положения;

$\frac{\rho}{\gamma}$ – удельная энергия давления.

Удельная кинетическая энергия движущейся частицы жидкости определяется по выражению:

$$E_k = \frac{U^2}{2g},$$

где U – скорость движения частицы жидкости;

g – ускорение свободного движения.

Таким образом, полная удельная энергия частицы жидкости $E = z + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{U^2}{2g}$

Пусть в сечении 1-1 элементарной струйки скорость движения жидкости u_1 , давление p_1 , а высота расположения центра тяжести, отсчитанная от произвольной горизонтальной плоскости сравнения z_1 . В сечении 2-2 соответственно u_2 , p_2 , z_2 .

Тогда полная удельная энергия элементарной струйки в сечениях 1-1 и 2-2 равны:

$$E_1 = z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g}$$

$$E_2 = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g}$$

При движении идеальной жидкости не возникает сил трения, поэтому на основе закона сохранения энергии можно написать: $E_1 = E_2$ или

$$z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g}$$

Но т.к. сечения 1-1 и 2-2 были взяты произвольно, то $z + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} = \text{const}$

Это и есть уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.

Уравнение Бернулли показывает, что для элементарной струйки идеальной жидкости полная удельная энергия есть величина постоянная во всех сечениях.

Члены уравнения Бернулли измеряются в единицах длины и носят названия:

z – геометрический напор;

$\frac{\rho}{\gamma}$ – пьезометрическая высота;

$\frac{U^2}{2g}$ – скоростной напор.

Трехчлен $z + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{U^2}{2g}$ называется полным напором.

Геометрический смысл уравнения Бернулли: для идеальной движущейся жидкости сумма трех высот – геометрической, пьезометрической и скоростной – есть величина постоянная вдоль струйки, т.е. линия полного напора является линией, параллельной плоскости отсчета.

Энергетический смысл уравнения Бернулли: вдоль элементарной струйки идеальной жидкости удельная энергия постоянна. Таким образом, уравнение Бернулли представляет собой закон сохранения механической энергии при движении идеальной жидкости.

Если вместо идеальной жидкости рассматривать жидкость реальную, то по длине струйки полная удельная энергия будет убывать, т.к. часть ее затрачивается на преодоление сопротивлений движению, обусловленных вязкостью. В связи с этим для струйки реальной жидкости полная удельная энергия в сечении 1-1 будет всегда больше, чем в сечении 2-2 на величину потерь энергии h_w . Тогда уравнение Бернулли для струйки реальной жидкости будет иметь вид:

$$z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + h_w$$

Величина h_w также измеряется в единицах длины и называется *потерянным напором*.

4.2. Описание опытного устройства

Устройство № 4 (рис. 4.1) имеет баки 1 и 2, сообщаемые через опытные каналы 3 и 4. Канал 3 имеет переменное сечение, канал 4 – постоянное. Каналы 3 и 4 соединены между собой равномерно расположенными пьезометрами I–V, служащими для измерения пьезометрических напоров в характерных сечениях каналов. Устройство № 4 заполнено подкрашенной водой. В одном из баков имеется шкала 5 для измерения уровня воды в баке.

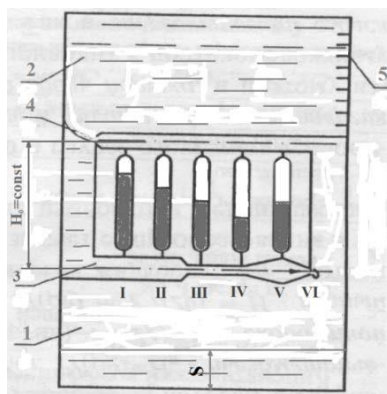


Рис. 3. Схема устройства № 4: 1, 2 – баки; 3, 4 – опытные каналы переменного и постоянного сечений; 5 – уровнемерная шкала; I–V – пьезометры. При переворачивании устройства № 4 на 180° благодаря постоянству напоров истечения H_0 во времени обеспечивается установившееся движение воды в нижнем канале. Другой канал в это время пропускает воздух, вытесняемый жидкостью из нижнего бака в верхний.

4.3. Задание

При выполнении работы необходимо:

- 1) снять показания пьезометрических трубок (I–V);
- 2) вычертить в масштабе канал 3 с пьезометрами (рис. 3). Соединить уровни жидкости в пьезометрах и построить пьезометрическую линию (p–p), показывающую изменение потенциальной энергии (давления) вдоль потока;
- 3) посчитать скоростные напоры $V^2/2g$ в сечениях I–VI;
- 4) посчитать полный запас удельной энергии жидкости в сечениях I–VI:

$$z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g}$$

- 5) построить график изменения полной удельной энергии жидкости вдоль канала 3 переменного сечения (линию напора, линию E–E);
- 6) дать оценку полученным результатам.

4.4. Методика и порядок проведения испытаний

Заполнить водой бак 2 устройства № 4, затем перевернуть устройство на 180° для получения течения в канале 3 переменного сечения.

Снять показания пьезометров I–VI ($p/\rho g$) по нижним кромкам менисков воды в них.

Одновременно секундомером измерить время t перемещения уровня воды в баке произвольно заданную величину S . Измеренные величины записать в табл. 4.1.

4.5. Обработка результатов измерений

По размерам A и B поперечного сечения бака, перемещению уровня S в баке за время t определить расход Q воды в канале, а затем вычислить среднюю скорость течения в характерных сечениях канала 3 (сечениях I–VI)

Зная среднюю скорость v в сечении канала, определить скоростной напор в данном живом сечении ($V^2/2g$).

Ось канала 3 расположена горизонтально, поэтому, приняв за плоскость отсчета 0–0 эту ось, получим равенство нулю геометрических напоров (z) в сечениях I–VI.

Складывая пьезометрические и скоростные напоры в сечениях канала I–VI, получим полные напоры в сечениях (H).

По измеренным пьезометрическим напорам строим пьезометрическую линию (1), а по рассчитанным полным напорам H строим напорную линию (2) (рис. 4.2).

Результаты измерений и вычислений заносим в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Экспериментальные данные и значения определяемых величин

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Сечения канала					
				I	II	III	IV	V	VI
1	Площадь сечения канала	$w \cdot 10^{-4}$	м^2						
2	Уровень воды в баке 1	$S \cdot 10^{-2}$	м						
3	Время наблюдения за уровнем S	t	сек						
4	Объем воды, поступивший в бак 1 за время t	$W \cdot 10^{-6}$	м^3						
5	Расход воды	$Q \cdot 10^{-6}$	$\text{м}^3/\text{с}$						
6	Средняя скорость в сечении	$V \cdot 10^{-2}$	$\text{м}/\text{с}$						
7	Скоростной напор в сечении	$V^2/2g \cdot 10^{-2}$	м						
8	Пьезометрический напор в сечении	$p/\rho g \cdot 10^{-1}$	м						
9	Полный напор в сечении	$H \cdot 10^{-2}$	м						

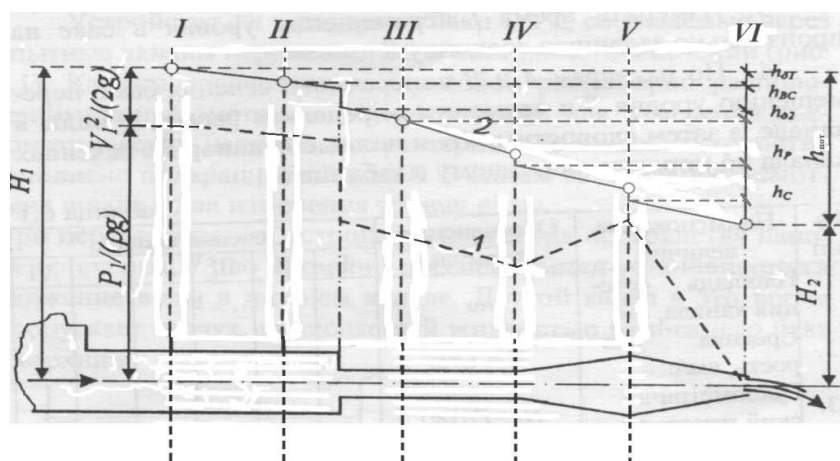


Рис. 4. Иллюстрация уравнения Бернулли: 1, 2 – пьезометрическая и

напорная линии; H_1 , H_2 – полные напоры (механические энергии) на входе и выходе из канала; $h_{тр}$, $h_{\partial 1}$, $h_{\partial 2}$, $h_{ВС}$, h_p , h_c – потери напора: суммарные, по длине на 1 и 2-м участках, на внезапное сужение, на плавное расширение и сужение

Контрольные вопросы

1. Что понимают под полной удельной энергией потока жидкости в живом сечении?
2. Что понимают под удельной энергией? Какова ее размерность?
3. В чем физический смысл коэффициента Кориолиса α ? Каковы пределы численных значений коэффициента α , входящего в уравнение Д. Бернулли?
4. Каковы условия применимости уравнения Д. Бернулли?
5. Что такое плоскость отсчета (плоскость сравнения) и как она назначается?
6. Что следует понимать под геометрическим напором и как он определяется?
7. Какой из законов физики выражает уравнение Д. Бернулли?
8. Каков геометрический смысл каждого члена уравнения Д. Бернулли в отдельности и всего уравнения в целом?
9. Каков энергетический смысл каждого члена уравнения Д. Бернулли в отдельности и всего уравнения в целом?
10. Что понимается под напором потока и как он определяется?
11. Что характеризует собой пьезометрическая линия?
12. Что понимается под пьезометрическим напором?
13. Как определить запас удельной потенциальной энергии в живом сечении потока?
14. Как изменяется удельная потенциальная энергия вдоль потока?
15. Как изменяется удельная кинетическая энергия вдоль потока при движении реальной жидкости?
16. Как изменяется пьезометрическая линия для трубопровода переменного сечения при постоянном расходе для реальной жидкости?
17. Как изменяется пьезометрическая линия для трубопровода постоянного сечения при установившемся движении вязкой жидкости?
18. Как изменяется линия полного напора по длине потока для реальной жидкости?
19. Каким отрезком на диаграмме уравнения Д. Бернулли характеризуется величина удельной кинетической энергии и потенциальной энергии давления?

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Задачи работы - визуальное наблюдение особенностей ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости в стеклянной трубке; приобретение

навыков экспериментального определения расхода жидкости, средней скорости движения жидкости; вычисление чисел Рейнольдса на основании экспериментальных данных.

Описание экспериментальной установки

Для изучения режимов движения жидкости используется экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.3. Установка включает в себя напорный бак **1**, в который вода поступает из водопроводной сети. Уровень воды в баке поддерживается на постоянной отметке благодаря холостому сливу **7**, представляющему собой

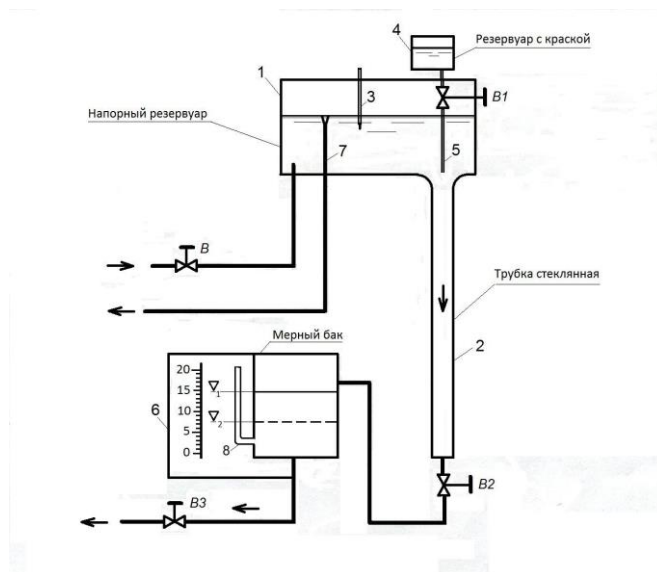


Рис.5

вертикальную трубу с воронкой, расположенной на заданном уровне. Из напорного бака **1** вода поступает в стеклянную трубку **2**, имеющую плавно скругленный вход, в которой наблюдаются режимы движения жидкости. Краска в стеклянную трубку подается из бачка **4** с помощью тонкой трубочки **5**, снабженной вентилем **В1**. Для регулирования расхода воды имеется вентиль **В2**, расположенный на выходе из стеклянной трубки. Вода, из стеклянной трубки поступает в мерный бак **3**, оборудованный пьезометром **8** с делениями для определения уровня жидкости в баке. Для опорожнения мерного бака служит труба, оборудованная вентилем **В3**. Для определения температуры воды служит термометр **3**.

Содержание работы

1. Проведение двух опытов для визуального наблюдения заподкрашенной жидкостью при разных режимах движения жидкости; измерение расхода и температуры воды.
2. Обработка опытных данных для вычисления чисел Рейнольдса, соответствующих наблюдаемым в опытах ламинарному и турбулентному режимам движения.

Порядок проведения опытов

1. Наполните бак **1** до максимальной отметки. Для этого откройте вентиль **В**. После наполнения бака закройте вентиль **В**.
2. С помощью вентиля **В1** и **В2** добейтесь того, чтобы в стеклянной трубке установился ламинарный режим и скорость выпускаемой краски была примерно равна скорости движения воды в стеклянной трубке.
3. Определите расход жидкости. Для этого закройте кран **В3** и, наблюдая за наполнением мерного бака по делениям мерного стекла **8**, с помощью секундомера определите продолжительность наполнения t заранее намеченного мерного объема.
4. Откройте кран **В3** и убедитесь, что мерный бак опорожнился.
5. Установите турбулентный режим движения. Для этого откройте вентили **В**, **В1** и **В3**. Регулируя вентилем **В1** подачу краски, убедитесь, что установился турбулентный режим движения жидкости. Закройте вентиль **В2** и приступайте к измерению расхода (см. п.3). Определите температуру воды в баке 1 с помощью термометра 3.

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислите расход воды
2. Вычислите среднюю скорость течения воды в стеклянной трубке
3. Определите число Рейнольдса ν
4. Сравните числа Рейнольдса, вычисленные для каждого опыта с нижним и верхним критическими числами Рейнольдса

Обратите внимание на соответствие полученных значений чисел Рейнольдса результатам визуальных наблюдений за режимом течения в стеклянной трубке.

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Задачи работы – определение потерь напора по длине и коэффициента гидравлического трения на основании данных опытов, изучение влияния средней скорости течения жидкости на величину потерь напора по длине, а также приобретение практических навыков в определении гидродинамического давления с помощью пьезометров и закрепление навыков в определении расхода объёмным способом.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для изучения потерь напора по длине представлена на рис.7.

Установка включает в себя трубопровод **1**, на рабочем участке которого длиной L подключены пьезометры Π_1 и Π_2 . Трубопровод присоединен к напорному баку **2**, где с помощью холостого слива **9** поддерживается постоянный уровень. В напорный бак вода подается центробежным насосом **4**, забирающим воду из емкости **3**, куда вода поступает из исследуемого трубопровода через мерный бак **7**. Таким образом, на установке используется замкнутая система водоснабжения. Подача воды насосом регулируется вентилем **5**. Расход воды в трубопроводе изменяется с помощью вентилем **6**, установленного в его конце. Мерный бак **7** оборудован вентилем **8**. Мерный бак наполняется при закрытом вентиле **8**. Отметки уровня воды в мерном баке визуальнo контролируются по шкале водомерного стекла, имеющегося на лицевой стенке мерного бака. Температура воды измеряется с помощью термометра.

Содержание работы

1. Проведение серии опытов по измерению потерь напора по длине на участке между пьезометрами Π_1 и Π_2 , соответствующих различным значениям расхода жидкости в трубе.

2. Определение на основании экспериментальных данных чисел Рейнольдса, коэффициентов гидравлического трения и области сопротивления.

3. Построение графика зависимости потерь напора от средней скорости и графическое определение показателя степени при средней скорости в этой зависимости.

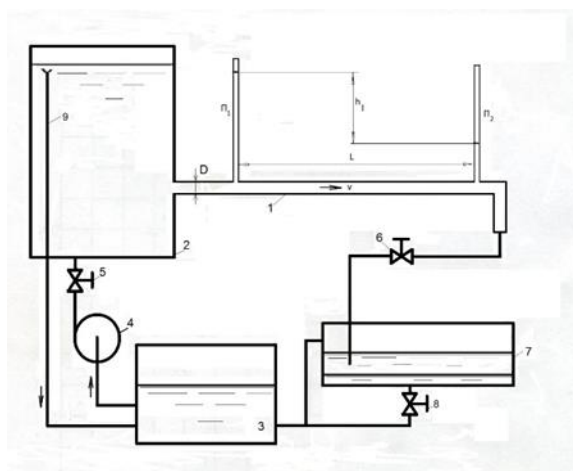


Рис.6

Порядок проведения опытов

1. Подготовьте установку к проведению опытов. Для этого включите насос **4**, откройте вентиль **5** и вентиль мерного бака **8**. Измерьте температуру воды в баке.
2. Установите в трубе максимально возможный расход. Для этого полностью откройте вентиль **6**, контролируя при этом уровни воды в пьезометрах Π_1 и Π_2 .
3. Снимите отсчеты по пьезометрам Π_1 и Π_2 .
4. Приступайте к измерению расхода. Для этого закройте вентиль **8** мерного бака и ручным секундомером определите время заполнения заранее намеченного мерного объема, которому отвечают два уровня воды в мерном баке по водомерному стеклу. Измените расход жидкости с помощью вентилей **6**, контролируя уровни жидкости в пьезометрах.

Повторите действия пунктов 3 и 4. Всего проведите 8-10 опытов.

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислите расход жидкости
2. Вычислите среднюю скорость
3. Определите кинематический коэффициент вязкости воды, зная её температуру
4. Вычислите число Рейнольдса
5. Найдите относительную шероховатость для исследуемого трубопровода $\frac{\Delta}{D}$
6. Вычислите предельные числа Рейнольдса
7. Установите область сопротивления. Для этого сопоставьте числа Рейнольдса, найденные в пунктах 4 и 6.
8. Найдите значения опытных потерь напора по формуле

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$$

где $z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$ и $z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ — показания пьезометров.

9. Определите опытные значения коэффициента гидравлического трения по формуле Вейсбаха – Дарси
10. Для каждого опыта, зная числа Рейнольдса (п.4), относительную шероховатость (п.5) и область сопротивления (п.7), определите расчетное значение коэффициента гидравлического трения $\lambda_{\text{расч}}$ по графику

Кольбука-Уайта [2].

11. Найдите расхождение между $\lambda_{\text{оп}}$ и $\lambda_{\text{расч}}$ по формуле

$$\frac{\lambda_{\text{расч}} - \lambda_{\text{оп}}}{\lambda_{\text{оп}}} 100\%.$$

12. Определите, какой степени m при скорости пропорциональны потери напора по длине для данной области.

13. Для этого постройте логарифмическую анаморфозу

14. Искомый показатель степени численно равен tq , который следует находить как отношение катетов с учетом масштабов (рис. 8). Убедитесь, что найденное значение соответствует установленной ранее области сопротивления (п.7).

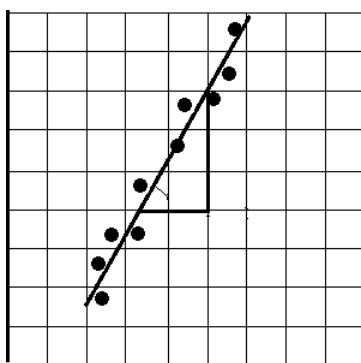


Рис.7

Лабораторная работа №7

ИЗУЧЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА

Задачи работы - получение и закрепление навыков экспериментального определения коэффициентов местного сопротивления, измерения расхода объемным способом, гидродинамических давлений с помощью пьезометров, построения напорной и пьезометрической линий по данным опытов.

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа проводится на той же установке, что и работа 4. Схема установки представлена на рис 8. Вода из напорного бака 2 поступает в трубопровод 1, имеющий местные сопротивления: резкий поворот 9 на 180° , резкое расширение 10 и резкое сужение 11. По длине трубопровода установлены десять пьезометров, служащих для измерения потенциальных напоров в этих сечениях. Вода из трубопровода поступает в мерный бак 7.

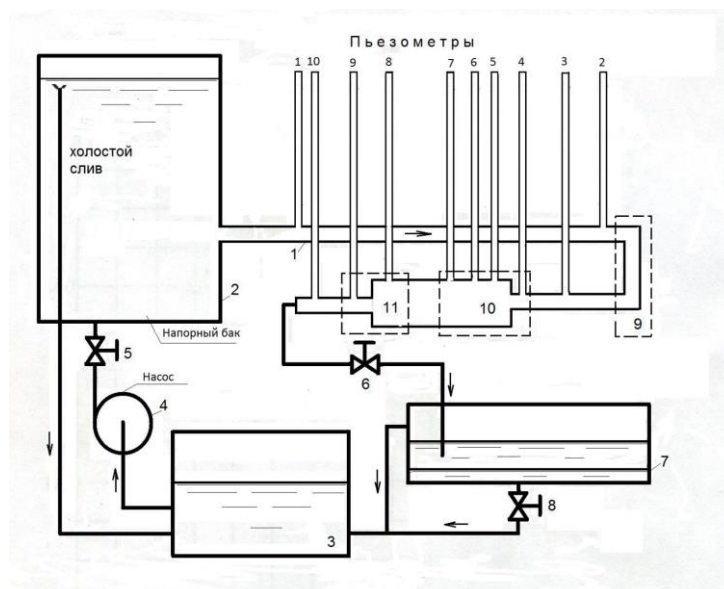


Рис.8

Содержание работы

1. Проведение опытов при различных расходах воды и определение потенциальных напоров по показаниям пьезометров.
2. Определение коэффициентов местного сопротивления на основании экспериментальных данных.
3. Сопоставление опытных значений коэффициентов местного сопротивления с коэффициентами, найденными в справочной литературе [2].
4. Построение по данным опытов напорной и пьезометрической линий.

Порядок проведения опытов

Подготовьте установку к проведению опытов: включите насос 4, откройте вентили 5 и 8.

1. Установите максимальный расход в трубопроводе. Для этого полностью откройте вентиль 6, контролируя уровень воды в пьезометрах (уровни воды должны быть в пределах шкалы пьезометров).
2. Снимите показания пьезометров.
3. Определите продолжительность наполнения мерного бака, соответствующую измеряемому расходу (более подробно см. работу 4). Вычислите значение расхода по формуле (1).
4. Уменьшите расход воды в трубопроводе и повторите измерения п.2 и п.3.

Всего проведите три опыта при разных расходах.

Обработка экспериментальных данных

1. Определите потенциальные напоры в сечениях до и после исследуемых сопротивлений. Потенциальные напоры соответствуют показаниям пьезометров. Рабочие номера пьезометров, для каждого местного сопротивления, указаны в исходных данных (см. бланк отчёта).

2. Определите скорость движения воды, скоростной напор и полный напор в сечениях до и после сопротивления.

3. Вычислите потери напора на каждом местном сопротивлении по результатам опытов, исходя из уравнения Бернулли, приняв $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

$$h_M = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right)$$

где $z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$ и $z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ — показания пьезометров соответственно до и послесопротивления;

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \text{ и } \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \text{ — скоростные напоры до и после сопротивления.}$$

4. Определите коэффициент местного сопротивления на основании данных опытов исходя из формулы Вейсбаха

$$\zeta_{\text{оп}} = \frac{h_M}{v_1^2 / 2g}$$

5. Определите расхождение в процентах между коэффициентами сопротивления, определенными на основании экспериментальных данных и коэффициентами, определенными из справочной литературы [2].

6. Постройте напорную и пьезометрическую линии на основании данных опытов для одного расхода.

Лабораторная работа №8 ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

Задачи работы - визуальное наблюдение явления истечения жидкости через отверстия и насадки; закрепление полученных навыков определения расхода объёмным способом; получение практических навыков определения координат струи; вычисление на основании экспериментальных данных коэффициентов расхода, скорости и сжатия струи; экспериментальная проверка зависимости

коэффициента расхода от числа Рейнольдса; экспериментальная проверка теоретической зависимости для определения времени опорожнения резервуара при свободном истечении воды из него через отверстие в тонкой стенке и внешний цилиндрический насадок.

Описание экспериментальной установки

Установка, схема которой представлена на рис.10, имеет замкнутую систему водоснабжения. Вода из резервуара *1* подается насосом *2* через вентиль *3* в напорный бак *4*. Для поддержания постоянного уровня воды в напорном баке имеется холостой слив *5*. В боковой стенке напорного бака имеется резьбовое отверстие, в котором крепятся диафрагмы с отверстиями и насадками. Струя, вытекающая из отверстия или насадки, попадает в мерный бак *9*, оборудованный двумя сбросными вентилями *7*. К этой же стенке сбросного бака крепится кронштейн *6* с пятью измерительными иглами, служащими для измерения координат струи x и z . Лицевая стенка напорного бака выполнена из органического стекла, что позволяет следить за уровнем воды в нем. Кроме того на этой стенке нанесены риски, отстоящие на определенную высоту от оси отверстия (насадки), что позволяет фиксировать начальный (H_1) и конечный (H_2) напоры в процессе опорожнения напорного бака.

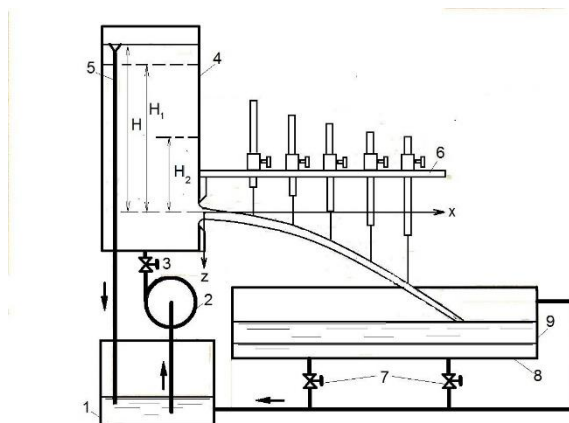


Рис. 9

Содержание работы

1. Проведение опытов с истечением воды через круглое отверстие. Экспериментальное определение коэффициента расхода отверстия и измерение координат струи с целью дальнейшего вычисления коэффициентов скорости и сжатия .
2. Проведение опытов с треугольным отверстием. Наблюдение явления инверсии струи.
3. Проведение опытов с истечением воды через насадки различных типов (цилиндрического, сходящегося и расходящегося). Наблюдение особенностей

истечения жидкости через насадки, определение их коэффициентов расхода.

4. Проведение опытов по определению времени опорожнения резервуара при истечении воды через круглое отверстие и внешний цилиндрический насадок. Сопоставление времени опорожнения, полученного в опыте, с расчетным значением.

Порядок проведения опытов

1. Убедитесь, что напорный бак опорожнен, и установите в резьбовом отверстии диафрагму с круглым отверстием.

2. Откройте сбросные вентили 7, включите насос 2 и полностью откройте вентиль насоса 3. Будет наполняться напорный бак.

3. Убедитесь, что напорный бак наполнен полностью, уровень воды в нем стабилизировался и приступайте к измерению расхода объёмным способом.

4. Определите температуру воды с помощью термометра.

5. Определите с помощью измерительных игл координаты оси струи, вытекающей из круглого отверстия. Обратите внимание на форму струи, вытекающей из отверстия.

Первый опыт завершен.

6. Выключите электродвигатель насоса (при этом напорный бак будет опорожняться как через насос, так и через отверстие), дождитесь полного опорожнения напорного бака 4, контролируя уровень воды в нем через прозрачную переднюю стенку.

7. Выверните из резьбового соединения диафрагму с отверстием и замените её на диафрагму с насадком, являющимся предметом исследований в следующем опыте.

8. Включите электродвигатель насоса и повторите операции пунктов 2,3,6.

Аналогичные опыты проведите для других типов насадков.

Опыты по определению времени опорожнения резервуара необходимо провести для круглого отверстия и внешнего цилиндрического насадка.

Для этого необходимо:

1. При выключенном насосе и полностью опорожненном напорном баке установите диафрагму с круглым отверстием.

2. Убедитесь, что вентили 3 и 7 полностью открыты, после чего включите насос. После того как напорный бак заполнится и уровень воды в нем стабилизируется, закройте вентиль 3 и выключите насос. Напорный бак начнет опорожняться только через отверстие в стенке бака.

3. Определите с помощью секундомера время опорожнения объема жидкости напорного бака, заключенного между рисками на его лицевой стенке, отвечающими H_1 и H_2 .

Повторите опыт с внешним цилиндрическим насадком.

Обработка экспериментальных данных

Определение коэффициентов расхода, скорости и сжатия

1. Вычислите расход жидкости Q , среднюю скорость движения жидкости \bar{v} , число Рейнольдса Re_D . Для насадка все параметры вычисляем для выходного сечения;

2. Определите косвенным путем опытные значения коэффициентов расхода отверстия и насадков, используя формулы

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2gH} \quad Q = \mu_n \omega \sqrt{2gH},$$

где μ_0 и μ_n — коэффициенты расхода отверстия и насадка;

H — напор над центром тяжести выходного сечения отверстия или насадка

3. Вычислите на основании экспериментальных данных коэффициент скорости для отверстия по формуле

$$\varphi_0 = \frac{x}{z} \frac{1}{Hz}$$

где x и z — координаты струи.

4. Вычислите коэффициент сжатия струи по формуле

$$\mu_0 = \varepsilon \varphi$$

Сопоставьте коэффициенты, μ_0 , μ_n , φ — определенные на основании опытных данных, с найденными по справочной литературе [2].

5. Сопоставьте продолжительность опорожнения резервуара, измеренную при проведении опытов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Н. Брюханов, В. А. Жила. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. – М.: Инфра-М, 2010.
- 2 И. Калицун. Гидравлика, водоснабжение и канализация. – М.: Стройиздат, 2000.
- 3 И. Калицун, Е. В. Дроздов, А. С. Комаров, К. И. Чижик. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. – М.: Стройиздат, 2005.
- 4 Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И. Гидравлика. М.: Л.: Энергия, 1964. 484 с.
- 5 Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости). М.: Стройиздат, 1975. 323 с.
- 6 Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
- 7 Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика. Общий курс. Киев: Вища шк., 1989. 215 с.
- 8 Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод. М.: Недра, 1991. 331 с.
- 9 Калицун В.И., Кедров В.С., Ласков Ю.М., Сафонов П.В. Гидравлика, водоснабжение и канализация. М.: Стройиздат, 1980. 359 с.
- 10 Норкус В.П., Станпонкус В.А., Малинаускас И.А. Гидравлика, гидравлические машины и гидроприводы: метод. указания и контрольные задания для студентов-заочников инженерно-технических специальностей вузов / под ред. Ю.Ю. Мицевичюса. М.: Высш. шк., 1989. 56 с.
- 11 Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.В. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
- 12 Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия / под ред. Н.М. Константинова. М.: Высш. шк., 1987. 735 с.
- 13 Константинов А.М. Гидравлика. Киев: Вища шк., 1981. 360 с.
- 14 Слабожанин Г.Д., Слабожанин Д.Г. Практикум по механике жидкости на портативной лаборатории «Капелька»: метод. указания к лабораторным работам. Томск: Изд-во Томского архитектурно-строит. ун-та, 2002. 30 с.
- 15 Справочник по гидравлике / под ред. В.А. Большакова. Киев: Вища шк., 1984. 343 с.
- 16 Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.