

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**В. А. Наумов**

## **МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Учебно-методическое пособие по лабораторным работам для студентов  
вузов, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки  
«Природообустройство и водопользование»**

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2017

УДК 628.1

### РЕЦЕНЗЕНТ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта» Н. Л. Великанов

Наумов, В. А.

Методы научных исследований. Учебно-методическое пособие / В. А. Наумов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. – 28 с.

В данном пособии содержатся элементы теории и задания к семи лабораторным работам. Даны методические указания по выполнению и обработке результатов измерений, составлению отчетов. В конце каждой лабораторной работы приводятся вопросы для подготовки студентов к их защите.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки «Природообустройство и водопользование».

Рис. 10, табл. 13, список лит. – 9 наименований

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено кафедрой водных ресурсов и водопользования ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 01 сентября 2017 г., протокол № 1

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию методической комиссией строительного факультета ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 12 сентября 2017 г., протокол № 1

УДК 628.1

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2017 г.

© Наумов В. А. 2017 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1 Определение массы тела на электронных весах высокого класса точности и обработка результатов прямых измерений.....	5
Лабораторная работа № 2 Определение плотности тела и обработка результатов косвенных измерений.....	7
Лабораторная работа № 3 Исследование коэффициента фильтрации грунта.....	10
Лабораторная работа № 4 Исследование истечения жидкости через отверстия и насадки .....	13
Лабораторная работа № 5 Экспериментальное определение гидравлической крупности частиц .....	16
Лабораторная работа № 6 Исследование характеристик центробежного насоса .....	18
Лабораторная работа № 7 Исследование тарировочной зависимости водомерного сопла .....	21
Литература .....	24
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	25
Приложение А. Величины коэффициента Стюдента .....	25
Приложение Б. Коэффициент кинематической вязкости воды при различных температурах. Справочные значения коэффициентов для отверстий и насадков .....	26
Приложение В. Определение КПД насосной установки в рабочей точке.....	27

## Введение

Понятие «наука» имеет несколько основных значений. Во-первых, под наукой (греч. *episteme*, лат. *scientia*) мы понимаем сферу человеческой деятельности, направленную на выработку и теоретическую схематизацию объективных знаний о действительности. Во втором значении наука выступает как результат этой деятельности – система полученных научных знаний. В-третьих, термин "наука" употребляется для обозначения отдельных отраслей научного знания. В-четвертых, науку можно рассматривать как отрасль культуры, которая существовала не во все времена и не у всех народов. В ходе исторического развития наука превратилась в производительную силу общества и важнейший социальный институт.

Непосредственные цели науки – это получение знаний об окружающем мире, предсказание процессов и явлений действительности на основе открываемых ею законов. В широком смысле ее цель – теоретическое отражение действительности. Наука создана для непосредственного выявления существенных сторон всех явлений природы, общества и мышления. К основным задачам науки можно отнести: 1) открытие законов движения природы, общества, мышления и познания; 2) сбор, анализ, обобщение фактов; 3) систематизацию полученных знаний; 4) объяснение сущности явлений и процессов; 5) прогнозирование событий, явлений и процессов; 6) установление направлений и форм практического использования полученных знаний.

Не всякое знание можно рассматривать как научное. Нельзя признать научными те знания, которые получает человек лишь на основе простого наблюдения. Эти знания играют в жизни людей важную роль, но они не раскрывают сущности явлений, взаимосвязи между ними, которая позволила бы объяснить, почему данное явление протекает так или иначе, и предсказать дальнейшее его развитие. Правильность научного знания определяется не только логикой, но, прежде всего обязательной проверкой его на практике. Поэтому особую роль приобретают экспериментальные методы научных исследований, некоторые из них изучаются в курсе лабораторных работ.

В учебном плане из 60 академических часов аудиторных занятий дисциплины «Методы научных исследований» 30 ч – лекции, 16 ч – практические занятия и 14 ч – лабораторные занятия. В данном пособии содержатся элементы теории и задания к семи лабораторным работам. Даны методические указания по выполнению и обработке результатов измерений, составлению отчетов. В конце каждой лабораторной работы приводятся вопросы для подготовки студентов к их защите.

Лабораторная работа № 1  
**Определение массы тела на электронных весах высокого класса точности  
и обработка результатов прямых измерений**

Задание

1. Нарисовать схему установки (рис. 1.1). Определить систематическую погрешность измерительных устройств.
2. Измерить массу образца своего варианта на электронных весах № 1 (AJ-620CE). Выполнить контрольные измерения на весах № 2 и 3.
3. Для весов № 1 рассчитать абсолютную и относительную погрешности прямых измерений. Найти доверительный интервал результатов измерений.
4. Результаты измерений и вычислений по своему варианту занести в табл. 1.1.
5. Заполнить сводную табл. 1.2 расчетов по всем вариантам. Сравнить относительные погрешности измерений разных устройств.

Методические указания

1. Ознакомиться с характеристиками электронных весов AJ-620CE:  
максимальная масса – 620 г;  
минимальная масса – 0,1 г;  
действительная цена деления – 0,001 г;  
допускаемая погрешность при поверке – 0,005 г;  
допускаемая погрешность при эксплуатации – 0,01 г;  
класс точности по ГОСТ Р 53228-2008 – I;  
диапазон рабочих температур: +10+30°C;  
электрическое питание от сети переменного тока напряжением 187-242 В.
2. Вращая две передние ножки весов, установить их так, чтобы пузырек индикатора уровня находился в центре, как показано на рис. 1.1.
3. Каждое измерение на весах № 1 выполнить не менее пяти раз. При выполнении контрольных измерений на весах № 2 и 3, определить их погрешность по шкалам.
4. Расчеты выполняются по следующим формулам.

Среднее выборочное измерений массы (для результатов на весах № 1):

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i, \quad (1.1)$$

где  $n$  – количество измерений;  $m_i$  – результат  $i$ -го измерения.

Среднее квадратичное отклонение измерений

$$\bar{\sigma}_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}. \quad (1.2)$$



Рис. 1.1. Электронные весы AJ-620CE. Установка уровня

Абсолютная случайная погрешность прямых измерений

$$\Delta_{m/сл} = t_{\gamma, n-1} \cdot \frac{\overline{\sigma}_m}{\sqrt{n}}, \quad (1.3)$$

где  $t_{\gamma, n-1}$  – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности  $\gamma$  и числа степеней свободы  $(n-1)$ ; приведен в приложении А. Принять  $\gamma=0,95$ .

Границы доверительного интервала результатов находятся по формуле

$$[\overline{m} - \Delta_{m/сл}; \overline{m} + \Delta_{m/сл}]. \quad (1.4)$$

Истинное значение результатов измерений с вероятностью  $\gamma$  находится в доверительном интервале, определенном по формуле (1.4).

Абсолютная полная погрешность прямых измерения

$$\Delta_m = \sqrt{(\Delta_{m/сл})^2 + (\Delta_{m/сист})^2}, \quad (1.5)$$

где  $\Delta_{m/сист}$  – систематическая погрешность измерительного устройства; определяется по классу точности прибора или по половине наименьшей цены деления шкалы. Для весов № 2 и 3  $\Delta_m = \Delta_{m/сист}$ .

Относительная погрешность прямых измерений в процентах

$$\varepsilon_m = 100 \cdot \Delta_m / m. \quad (1.6)$$

5. Результаты измерений и вычислений по образцу своего варианта на весах № 1 занести в табл. 1.1. Затем заполнить общую для всей группы табл. 1.2. Сравнить результаты измерений и относительные погрешности измерений разных устройств и сделать вывод.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и вычислений по образцу своего варианта на электронных весах № 1

Номер измерения	$m_i$	$m_i - \bar{m}$	$(m_i - \bar{m})^2$
	г	г	г <sup>2</sup>
1			
2			
3			
4			
5			
$\Sigma$			

Таблица 1.2 – Результаты расчетов по всем образцам

Номер образца	На весах № 1			На весах № 2			На весах № 3		
	$\bar{m}$ , г	$\Delta m$ , г	$\varepsilon_m$ , %	$\bar{m}$ , г	$\Delta m$ , г	$\varepsilon_m$ , %	$\bar{m}$ , г	$\Delta m$ , г	$\varepsilon_m$ , %
1									
2									
...									

### Контрольные вопросы

1. Для чего проводят серию измерений одной величины?
2. Что такое выборочное среднее значение измерений?
3. Как найти среднее квадратичное отклонение измерений?
4. Как рассчитать абсолютную случайную погрешность прямых измерений?
5. От каких параметров зависит величина коэффициента Стьюдента?
6. Что такое доверительный интервал измерений?
7. Что такое систематическая погрешность измерительного устройства?
8. Как рассчитать абсолютную полную погрешность прямых измерений?
9. Как рассчитать относительную погрешность прямых измерений?

### Лабораторная работа № 2

#### Определение плотности тела и обработка результатов косвенных измерений

#### Задание

1. Нарисовать схему установки (рис. 2.1). Определить систематическую погрешность измерительных устройств.
2. Измерить массу каждого из пяти образцов своего варианта на электронных весах.

3. С помощью мерной емкости найти объем всех образцов и рассчитать средний объем образца. Вычислить среднюю плотность материала.

4. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности прямых и косвенных измерений.

5. Результаты измерений и вычислений по своему варианту занести в табл. 2.1.

6. Заполнить сводную табл. 2.2 расчетов по всем вариантам. Сравнить средние плотности и относительные погрешности косвенных измерений.

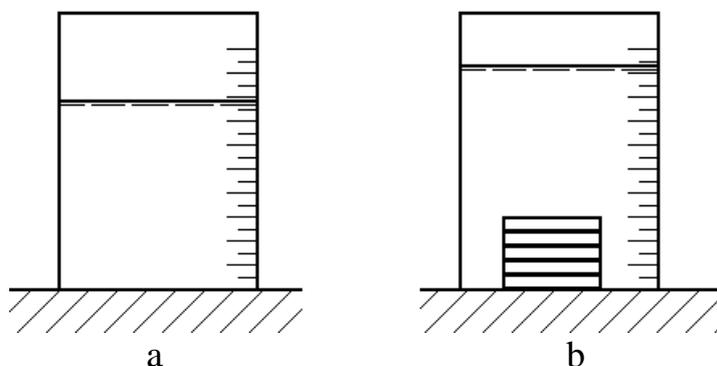


Рис. 2.1. Мерная емкость: а – с водой; б – с водой и образцами

### Методические указания

Косвенными измерениями называют такие, которые получаются в результате расчета по определенным формулам с использованием результатов прямых измерений. В лабораторной работе № 2 прямыми измерениями получают массу и объем образцов, а косвенными – их плотность.

Следует обратить внимание на то, что сетка мерной емкости не позволяет найти объем одного образца, поэтому следует записать объем воды в мерной емкости, опустить в нее все образцы. Найти, на сколько увеличился общий объем (это объем всех образцов), и рассчитать средний объем одного.

При косвенных измерениях, в отличие от прямых, сначала рассчитывают относительную погрешность, а затем – абсолютную. Расчеты выполняются по следующим формулам.

Среднее выборочное измерений массы:

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i, \quad (2.1)$$

где  $n$  – количество измерений;  $m_i$  – результат  $i$ -го измерения.

Среднее квадратичное отклонение измерений массы

$$\bar{\sigma}_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}. \quad (2.2)$$

Абсолютная случайная погрешность прямых измерений

$$\Delta_{m/сл} = t_{\gamma, n-1} \cdot \frac{\bar{\sigma}_m}{\sqrt{n}}, \quad (2.3)$$

где  $t_{\gamma, n-1}$  – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности  $\gamma$  и числа степеней свободы  $(n-1)$ ; приведен в приложении А. Принять  $\gamma=0,95$ .

Абсолютная полная погрешность прямых измерения массы образца:

$$\Delta_m = \sqrt{(\Delta_m / \text{сл})^2 + (\Delta_m / \text{сист})^2}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta_m / \text{сист}$  – систематическая погрешность измерительного устройства; определяется по классу точности прибора или по половине наименьшей цены деления шкалы. Для измерения объема  $\Delta_V = \Delta_V / \text{сист}$ .

Относительная погрешность прямых измерений в процентах

$$\varepsilon_m = 100 \cdot \Delta_m / \bar{m}, \quad \varepsilon_V = 100 \cdot \Delta_V / \bar{V}. \quad (2.5)$$

Средняя плотность материала образца (косвенное измерение)

$$\bar{\rho} = \bar{m} / \bar{V}. \quad (2.6)$$

Относительная и абсолютная погрешности плотности материала (косвенное измерение):

$$\varepsilon_\rho = \sqrt{\left(\frac{\Delta_m}{\bar{m}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_V}{\bar{V}}\right)^2} \cdot 100\% = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_V^2}, \quad \Delta_\rho = \frac{\varepsilon_\rho \cdot \bar{\rho}}{100}. \quad (2.7)$$

Таблица 2.1 – Результаты измерений и вычислений по образцу своего варианта на электронных весах № 1

Номер измерения	$m_i$	$m_i - \bar{m}$	$(m_i - \bar{m})^2$
	г	г	г <sup>2</sup>
1			
2			
3			
4			
5			
$\Sigma$			

Таблица 2.2 – Результаты расчетов по всем образцам

Вариант	$\bar{m}$ , г	$\Delta_m$ , г	$\varepsilon_m$ , %	$\bar{V}$ , см <sup>3</sup>	$\Delta_V$ , см <sup>3</sup>	$\varepsilon_V$ , %	$\bar{\rho}$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta_\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\varepsilon_\rho$ , %
1									
2									
...									

#### Контрольные вопросы

1. Является ли выборочное среднее значение массы случайной величиной?
2. Почему для определения объема образца проводят только одно измерение?
3. Как найти среднее квадратичное отклонение измерений?
4. От каких параметров зависит величина коэффициента Стьюдента?
5. Что такое систематическая погрешность измерительного устройства?

6. Как рассчитать абсолютную полную погрешность прямых измерений?
7. Как рассчитать относительную погрешность косвенных измерений?
8. Как рассчитать абсолютную погрешность косвенных измерений?

### Лабораторная работа № 3 Исследование коэффициента фильтрации грунта

#### Задание

1. Ознакомиться с устройством прибора КФ-ООМ и нарисовать его схему с указанием составных частей (рис. 3.1). Все размеры указывать в сантиметрах.
2. До начала опытов измерить температуру воды  $T$ , высоту образца грунта  $L$ , массу грунта. Диаметр мерного цилиндра  $D = 5,65$  см. Рассчитать плотность грунта.
3. Проконтролировать увлажнение грунта. В процессе фильтрации, начиная с уровня воды 5 мл, когда уровень воды достигнет делений 10, 15, 20, 25, 30 мл фиксировать время по секундомеру и перепад глубин воды ( $H_1 - H_2$ ).
4. Рассчитать коэффициент фильтрации в условиях опытов (см/с), пересчитать применительно к  $10^\circ\text{C}$  (м/сут.).
5. Результаты измерений и вычислений по своему варианту занести в табл. 3.1. Сравнить результаты вычислений, найти средние значения по всем опытам.

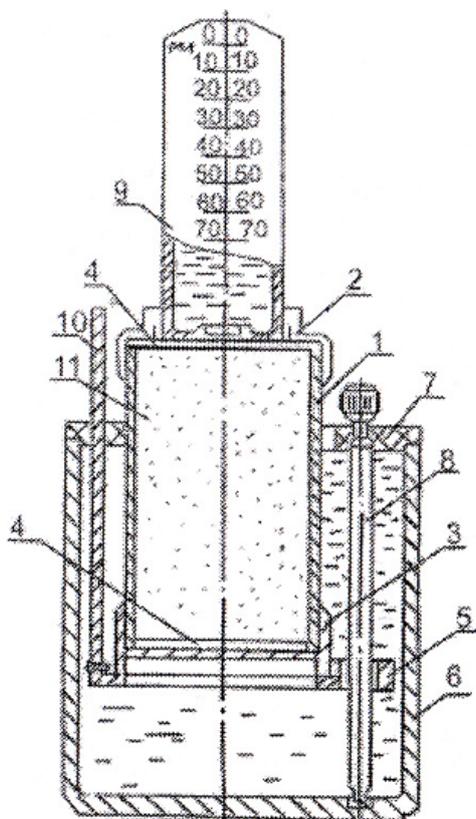


Рис. 3.1. Прибор КФ-ООМ: 1 – цилиндр; 2 – муфта; 3 – перфорированное дно; 4 – латунная сетка; 5 – подставка; 6 – корпус; 7 – крышка; 8 – подъемный винт; 9 – стеклянный баллон со шкалой объема фильтрующейся жидкости; 10 – планка со шкалой градиентов напора; 11 – испытуемый образец грунта

#### Методические указания

Прибор предназначен для определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов по ГОСТ 25584-2016. Коэффициент фильтрации определяют на образцах ненарушенного (природного) сложения или нарушенного сложения заданной плотности. Отбор, упаковка, транспортирование образцов грунта ненарушенного сложения должны производиться по ГОСТ 12071-2014.

Для определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов нарушенного сложения следует применять образцы, высушенные до воздушно-

сухого состояния. Максимальный размер частиц песчаных грунтов не должен превышать  $1/5$  внутреннего диаметра прибора для определения коэффициента фильтрации.

Для насыщения образцов грунта и фильтрации применяют грунтовую воду с места отбора грунта или воду питьевого качества. В случаях, устанавливаемых программой исследований, допускается применять дистиллированную воду.

К испытанию грунт следует подготавливать в такой последовательности:

- песок и воду, предназначенные для определения коэффициента фильтрации, выдерживают в лаборатории до выравнивания их температуры с температурой воздуха;

- из корпуса прибора извлекают фильтрационную трубку и разбирают ее;

- заполняют цилиндр испытываемым грунтом (см. ниже);

- в корпус наливают воду и вращением подъемного винта поднимают подставку до совмещения отметки градиента напора на планке с верхним краем крышки корпуса;

- устанавливают цилиндр с грунтом на подставку и вращением подъемного винта медленно погружают в воду до отметки градиента напора 0,8, оставляют его в таком положении до тех пор, пока грунт увлажнится.

В процессе водонасыщения грунта поддерживают постоянный уровень воды у верхнего края корпуса. Помещают на образец грунта латунную сетку, надевают муфту на цилиндр; вращением подъемного винта опускают фильтрационную трубку в крайнее нижнее положение и оставляют на 15 мин.

Заполнение цилиндра испытываемым грунтом ненарушенного сложения выполняют в следующем порядке: заранее взвешенный цилиндр ставят заостренным краем на выровненную поверхность грунта и винтовым прессом (или рукой) слегка вдавливают его в грунт, обозначая границы будущего образца для проведения испытаний; грунт у заостренного края цилиндра (с внешней его стороны) срезают острым ножом в виде столбика диаметром на 0,5-1 мм больше диаметра цилиндра и высотой примерно 10 мм. Одновременно, по мере срезания грунта, легким надавливанием пресса постепенно надвигают цилиндр на грунт, не допуская перекоса, до полного заполнения цилиндра.

В грунт, из которого не удастся вырезать столбик, цилиндр вдавливают; верхний торец образца грунта зачищают ножом вровень с краями цилиндра и накрывают заранее взвешенной пластинкой; подхватывают цилиндр с грунтом снизу лопаткой, перевертывают его, зачищают нижний торец образца грунта вровень с краями цилиндра и также накрывают заранее взвешенной пластинкой; взвешивают цилиндр с образцом грунта и покрывающими его пластинками; определяют плотность грунта; надевают на цилиндр с образцом грунта дно с лагунной сеткой, покрытой кружками марли.

Заполнение цилиндра грунтом нарушенного сложения выполняют в следующем порядке, на цилиндр надевают дно с латунной сеткой, покрытой кружком марли; наполняют цилиндр грунтом через верх слоями толщиной

1-2 см. Заполнение цилиндра испытываемым грунтом в предельно рыхлом и предельно плотном состоянии выполняют в следующем порядке: цилиндр с дном и латунной сеткой, покрытой кружком марли, взвешивают; для получения образца в предельно рыхлом состоянии цилиндр заполняют грунтом, насыпая его с высоты 5 -10 см без уплотнения, в предельно плотном состоянии - слоями толщиной 1-2 см с уплотнением каждого слоя трамбованием; зачищают поверхность образца грунта вровень с краями цилиндра и взвешивают цилиндр с грунтом.

Коэффициент фильтрации грунта определяют в следующем порядке: вращением подъемного винта устанавливают цилиндр с грунтом до совмещения отметки необходимого градиента напора на планке с верхним краем крышки корпуса и доливают воду в корпус до верхнего его края. Испытания проводят при поэтапном увеличении значений градиента напора; измеряют температуру воды; заполняют мерный стеклянный баллон водой и, закрывая пальцем его отверстие, опрокидывают отверстием вниз, подносят возможно ближе к цилиндру с грунтом и, отнимая палец, быстро вставляют в муфту фильтрационной трубки так, чтобы его горлышко соприкасалось с латунной сеткой, а в баллон равномерно поднимались мелкие пузырьки воздуха. Если в мерный баллон прорываются крупные пузырьки воздуха, то его необходимо опустить ниже, добившись появления мелких пузырьков; отмечают время, когда уровень воды достигнет деления шкалы мерного баллона, отмеченного цифрой 10 (или 20) см<sup>3</sup>, принимая это время за начало фильтрации воды. В дальнейшем фиксируют время, когда уровень воды достигнет, соответственно, делений 20, 30, 40, 50 (или 20, 40, 60, 80) см<sup>3</sup> или других кратных значений. Производят не менее четырех отсчетов.

#### Расчетные формулы

Площадь сечения и объем грунта в мерном цилиндре:

$$S = \pi \cdot D^2 / 4, V = S \cdot L. \quad (3.1)$$

Плотность сухого грунта:

$$\rho = m / V, \quad (3.2)$$

где  $m$  – масса грунта (г), находится как разность массы цилиндра с грунтом и без него.

Градиент напора:

$$J_i = (H_{1i} - H_{2i}) / L, \quad (3.3)$$

где  $L$  – высота образца грунта;  $H_1$  – глубина слоя воды над грунтом;  $H_2$  – глубина слоя воды под грунтом.

Фильтрационный расход воды (см<sup>3</sup>/с = мл/с):

$$Q_i = \Delta V_i / \Delta t_i, \Delta V_i = 5 \text{ мл} = 5 \text{ см}^3, \Delta t_i = t_i - t_{i-1}. \quad (3.4)$$

Фильтрационная скорость воды (см/с):

$$W_i = Q_i / S. \quad (3.5)$$

Коэффициент фильтрации в условиях опытов (см/с):

$$k_i = W_i / J_i. \quad (3.6)$$

Коэффициент фильтрации, пересчитанный применительно к 10°C (м/сут):

$$k_{10i} = 864 \cdot k_i / (0,7 + 0,03 \cdot T), \quad (3.7)$$

где 864 – коэффициент перевода (из см/с в м/сут).

Таблица 3.1 – Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Отметка мл	$t$ мин	$H_1 - H_2$ см	$J$ -	$Q$ см <sup>3</sup> /с	$W$ см/с	$k$ см/с	$k_{10}$ м/сут
1	10							
2	15							
3	20							
4	25							
5	30							
Средние								

### Контрольные вопросы

1. Запишите закон линейной фильтрации Дарси.
2. Что такое градиент напора?
3. Как коэффициент фильтрации зависит от свойств грунта?
4. Формула, связывающая фильтрационный расход и скорость фильтрации?
5. Зависимость коэффициента фильтрации от температуры воды.
6. Как определить относительную погрешность величин, измеряемых в работе?
7. Как рассчитать относительную погрешность определения коэффициента фильтрации?

### Лабораторная работа № 4

#### Исследование истечения жидкости через отверстия и насадки

#### Задание

1. Ознакомиться с установкой для исследования истечения и нарисовать ее схему с указанием составных частей (рис. 4.1).
2. Выполнить измерения величин  $H$ ,  $X$ ,  $m$ ,  $t$  при уменьшении напора отдельно для истечения из отверстия, из насадка.
3. Рассчитать скорости истечения, расходы воды, величины коэффициентов  $\varphi$ ,  $\mu$ ,  $\varepsilon$  в каждом опыте.
4. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1. Найти средние значения коэффициентов. Сравнить их для отверстия и насадка.
5. Построить зависимости  $Q(H)$  (для отверстия и насадка) и  $V(H)$  (для отверстия и насадка) – по две кривые на каждом графике. Сравнить построенные кривые.

#### Методические указания

Отверстие называется малым, если его вертикальный размер в 5-10 раз меньше глубины погружения под уровень жидкости. Стенка считается тонкой,

если вытекающая жидкость соприкасается лишь с кромкой отверстия, обращенной внутрь сосуда. Струя жидкости, вытекая (рис. 4.1) из круглого отверстия диаметром  $d$  под напором  $H$ , сужается на расстоянии, примерно равном  $0,5d$  от стенки сосуда. Сжатие струи происходит за счет инерции частиц жидкости, движущихся к отверстию по криволинейным траекториям.

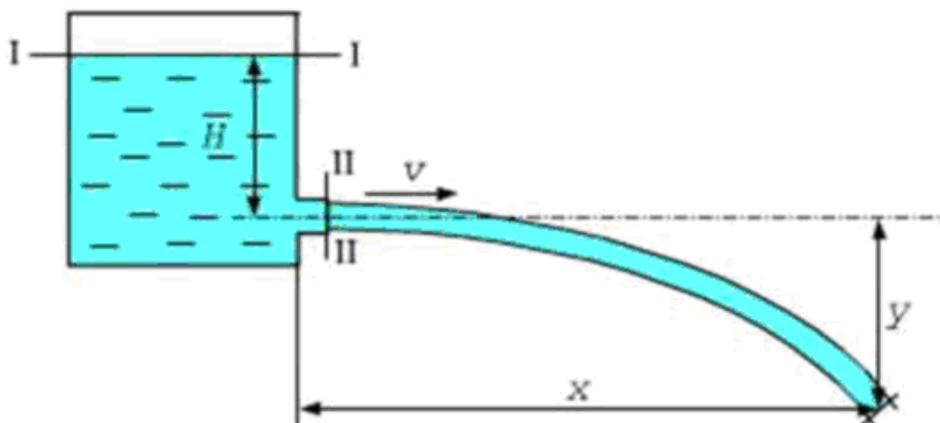


Рис. 4.1. Схема установки

Отношение площади сечения струи в сжатом сечении и площади отверстия называется коэффициентом сжатия  $\varepsilon = \omega_c / \omega_o$ , где  $\omega_c$  — площадь сечения струи;  $\omega_o$  — площадь сечения отверстия. Отношение скорости (расхода) истечения реальной жидкости из отверстия к скорости (расходу) истечения идеальной жидкости при том же напоре называется коэффициентом скорости  $\varphi$  (расхода  $\mu$ ). Поэтому значения всех названных коэффициентов в расчетах не могут превысить единицу.

Насадком называется короткий патрубок длиной  $l = (3 \div 4)d$ , приставленный к отверстию в резервуаре. Насадки применяются на практике с целью увеличения расхода, получения дальнобойной струи и т.п. По форме насадки разделяются на цилиндрические, конические сходящиеся, конические расходящиеся, коноидальные (выполненные по форме сжатой струи) и др. По расположению относительно сосуда — на внешние и внутренние (входит внутрь сосуда).

Струя жидкости в начале внешнего цилиндрического насадка подвергается сжатию, но в дальнейшем, постепенно расширяясь, вытекает из него полным сечением ( $\varepsilon = 1$ ). Между сжатой струей и стенкой насадка образуется зона понижения давления (вакуум). Максимальная величина вакуума  $h_{\text{вак}} = (0,75 \div 0,8)H$ . Потери напора в цилиндрическом насадке больше, чем в отверстии, и складываются из потерь при обтекании кромок отверстия при выходе, потерь при расширении струи после сжатия и потерь по длине насадка. Для цилиндрического насадка струя на выходе заполняет все сечение. Внешний цилиндрический насадок по сравнению с отверстием увеличивает на 34 % расход жидкости, вытекающей из сосуда, и уменьшает скорость истечения на 15%.

Увеличение расхода при помощи насадка объясняется тем, что образуется зона понижения давления и увеличивается площадь сечения струи на выходе. Уменьшение скорости обусловлено увеличением потерь напора в связи с

расширением струи в насадке. Цилиндрический насадок дает увеличение расхода по сравнению с отверстием только при выполнении ряда условий. Наиболее важными из них являются следующие: насадок должен иметь длину  $(3 \div 4) d$ ; абсолютное давление в насадке вблизи сжатого сечения должно быть больше давления парообразования при заданной температуре. Для воды считается допустимым вакуум 8 м водяного столба.

### Расчетные формулы

Площадь отверстия:

$$S_0 = \pi \cdot d^2 / 4, \quad (4.1)$$

где  $d$  – диаметр отверстия (насадка).

Расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ):

$$Q = m / (\rho \cdot t), \quad (4.2)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $m$  – масса воды,  $t$  – время.

Скорость истечения струи ( $\text{м}/\text{с}$ ):

$$V = X \cdot \sqrt{g / (2Y)}, \quad (4.3)$$

где  $X$  – длина струи,  $Y$  – возвышение оси отверстия над линейкой.

Коэффициент скорости:

$$\varphi = V / \sqrt{2gH}. \quad (4.4)$$

Коэффициент расхода:

$$\mu = Q / (S_0 \sqrt{2gH}). \quad (4.5)$$

Коэффициент сжатия струи:

$$\varepsilon = \mu / \varphi. \quad (4.6)$$

Число Рейнольдса по идеальной скорости истечения:

$$Re_u = d \cdot \sqrt{2gH} / \nu, \quad (4.7)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды (по табл. П.Б.1).

Таблица 4.1 – Результаты измерений и вычислений

№ пп	$H$ М	$X$ м	$m$ кг	$t$ с	$Q$ $\text{м}^3/\text{с}$	$V$ м/с	$Re_u$ -	$\varphi$ -	$\mu$ -	$\varepsilon$ -
Малое отверстие в тонкой стенке										
1										
2										
...										
Средние										
Справочные										
Внешний цилиндрический насадок										
1										
2										
...										
Средние										
Справочные										

Справочные значения коэффициентов для отверстий и внешних цилиндрических насадков записать по приложению Б (табл. П.Б.2).

### Контрольные вопросы

1. Сравните скорость и расход при истечении воды через малое отверстие и через внешний цилиндрический насадок.
2. Как используют коэффициенты скорости и расхода в расчетах истечения через отверстие?
3. Как рассчитывается в работе коэффициент скорости?
4. Как рассчитывается в работе коэффициент расхода?
5. Какие физические ограничения величин коэффициентов  $\varphi$ ,  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ?
6. Как охарактеризовать зависимость этих коэффициентов от числа Рейнольдса?
7. Назовите типы насадков.

### Лабораторная работа № 5

#### Экспериментальное определение гидравлической крупности частиц

##### Задание

1. Ознакомиться с установкой для исследования гидравлической крупности частиц и нарисовать ее схему с указанием составных частей (рис. 5.1).
2. Изучить методику измерений штангенциркулем и определить диаметр сферических частиц. Для частиц несферической формы выполнить три измерения и найти эквивалентный диаметр приближенным методом.
3. Найти массу частиц на электронных весах и рассчитать их плотность. Измерить температуру воды и определить коэффициент кинематической вязкости. Результаты измерения занести в табл. 5.1-5.2.
4. Выполнить измерения времени установившегося осаждения частиц не менее трех раз. Рассчитать экспериментальное значение гидравлической крупности, оценить погрешность косвенных измерений.
5. Вычислить теоретическое значение гидравлической крупности и сравнить с экспериментальным значением.

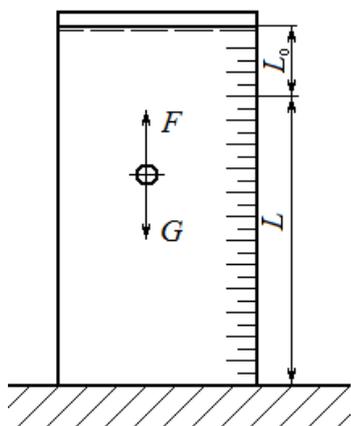


Рис. 5.1. Мерная емкость со сферической частицей, осаждающейся в воде:

$L_0$  – разгонный участок,  $L$  – участок измерений

#### Методические указания

Гидравлической крупностью частицы называют скорость  $W$  ее установившегося осаждения в неподвижной воде при определенной температуре

(обычно 15°C). Гидравлическая крупность частицы зависит от ее размера, плотности, формы; плотности и коэффициента кинематической вязкости жидкости (от последнего только в линейной области гидродинамического сопротивления, эта область в данной лабораторной работе не реализуется).

Следует опускать частицу на поверхность воды без начальной скорости (не бросать!). Включать секундомер следует после того, как частица пройдет разгонный участок (не менее 10 см). Частица достигает скорости установившегося осаждения, когда сила гидродинамического сопротивления  $F$  возрастет до величины силы тяжести за вычетом силы Архимеда  $G$ .

### Расчетные формулы

Среднее значение времени осаждения:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n t_i / n, \quad (5.1)$$

где  $n$  – количество измерений времени установившегося осаждения.

Гидравлическую крупность (экспериментальную) определяем по среднему значению времени осаждения:

$$W_{\text{Э}} = L / \bar{t}, \quad (5.2)$$

где  $L$  – глубина рабочего участка установившегося осаждения.

Число Рейнольдса позволяет определить область сопротивления осаждающейся частицы:

$$Re = W_{\text{Э}} \cdot d / \nu, \quad (5.3)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды. При  $Re > 800-1000$  область сопротивления можно считать квадратичной.

Объем и плотность частицы:

$$V = \pi \cdot d^3 / 6, \quad \rho_p = m / V. \quad (5.4)$$

Теоретическое значение скорости осаждения сферической частицы в квадратичной области сопротивления:

$$W = \sqrt{\frac{(1-\lambda) \cdot g \cdot d}{0,33 \cdot \lambda}}, \quad \lambda = \frac{\rho_f}{\rho_p}, \quad (5.5)$$

где  $\rho_f$  – плотность воды.

Относительное отклонение теоретического и экспериментального значений гидравлической крупности:

$$\eta = \frac{W_{\text{Э}} - W}{W} \cdot 100\%. \quad (5.6)$$

Оценку эквивалентного диаметра несферической частицы можно найти по приближенной формуле:

$$d_0 = (a + b + c) / 3, \quad (5.7)$$

где  $a, b, c$  – измерения несферической частицы в перпендикулярных плоскостях по убыванию.

Критерий формы В.В. Романовского

$$\Theta = d_0^2 / (a \cdot b). \quad (5.8)$$

Эмпирическая формула для вычисления динамического коэффициента формы в квадратичной области сопротивления при  $\Theta \geq 0,6$ :

$$\Gamma(\Theta) = 29,55 - 58,88 \cdot \Theta + 30,43 \cdot \Theta^2. \quad (5.9)$$

Теоретическое значение скорости осаждения несферической частицы в квадратичной области сопротивления:

$$W_0 = \sqrt{\frac{(1-\lambda) \cdot g \cdot d_0}{0,33 \cdot \lambda \cdot \Gamma(\Theta)}}. \quad (5.10)$$

Таблица 5.1 – Результаты измерений и вычислений для сферических частиц

№ п/п	$m$ г	$d$ мм	$\bar{t}$ с	$W_{\text{Э}}$ м/с	$Re$ -	$V$ м <sup>3</sup>	$\rho_p$ кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ -	$W$ м/с	$\eta$ %
1										
2										
3										
4										
5										

Таблица 5.2 – Результаты измерений и вычислений для несферической частицы

№ п/п	$t_i$ с	$m$ г	$a$ мм	$b$ мм	$c$ мм	$\rho_p$ кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ -	$Re$ -	$W_{\text{Э}}$ м/с	$W$ м/с	$\eta$ %
1											
2			$d_0 =$ $\Theta =$ $\Gamma =$								
3											
$\bar{t} =$											

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение гидравлической крупности частицы.
2. От чего зависит гидравлическая крупность частицы?
3. При каком соотношении сил, действующих на частицу, достигается установившаяся скорость осаждения?
4. Как влияет несферическая форма частицы на ее гидравлическую крупность?
5. Как рассчитать теоретическое значение скорости осаждения сферической частицы в квадратичной области сопротивления?
6. Какие коэффициенты используются для учета несферической формы частицы?
7. Как определить область гидродинамического сопротивления частицы при осаждении?

### Лабораторная работа № 6

#### Исследование характеристик центробежного насоса

##### Задание

1. Ознакомиться с установкой для исследования характеристик центробежного насоса и сделать ее рисунок с указанием составных частей (рис. 6.1). Изучить определение характеристик центробежного насоса.

2. Выполнить измерения величин  $h_y$ ,  $\tau$ ,  $P_M$ ,  $P_V$ ,  $N$  при уменьшении подачи насоса путем закручивания регулирующей задвижки.
3. Рассчитать подачу, напор, КПД насоса, числа Рейнольдса в каждом опыте. Показания манометра и вакуумметра при расчетах выразить в Па.
4. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 6.1.
5. Построить характеристики насоса: зависимости  $H-Q$ ,  $\eta-Q$ .

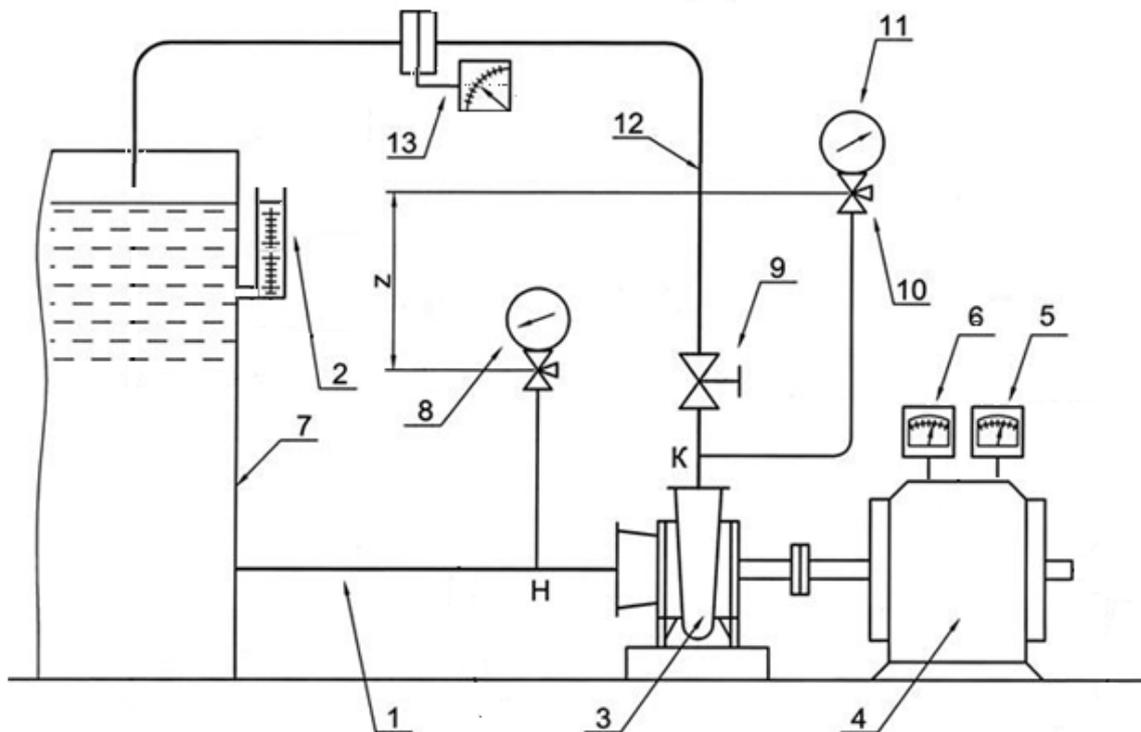


Рис. 6.1. Схема установки:

- 1 – всасывающий трубопровод; 2 – уровнемер; 3 – насос; 4 – электродвигатель;  
 5 – тахометр; 6 – ваттметр; 7 – открытый бак; 8 – мановакуумметр;  
 9 – регулирующая задвижка; 10 – трёхходовой кран; 11 – манометр;  
 12 – нагнетательный трубопровод; 13 – секундомер

### Методические указания

Если при наполненных жидкостью корпусе и всасывающем трубопроводе привести во вращение рабочее колесо, то жидкость, находящаяся в каналах рабочего колеса (между его лопастями), под действием центробежной силы будет отбрасываться от центра колеса к периферии, в результате чего в центральной части колеса создается разрежение, а на периферии — повышенное давление. Под действием этого давления жидкость из насоса поступает в напорный трубопровод, одновременно через всасывающий трубопровод под действием разрежения жидкость поступает в насос. Таким образом, осуществляется непрерывная подача жидкости центробежным насосом.

*Подача* насоса ( $Q$ ) – это объем перекачиваемой жидкости, подаваемой насосом через напорный патрубок в единицу времени.

*Напор* насоса ( $H$ ) – это механическая энергия, сообщаемая насосом единице веса жидкости.

*Полезная мощность* насоса ( $N_n$ ) – это механическая энергия, которая сообщается насосом жидкости в единицу времени.

Полный *коэффициент полезного действия* ( $\eta$ ) показывает, какую часть составляет полезная мощность от затрачиваемой; равен произведению КПД насоса на КПД электродвигателя. КПД насосной установки в рабочей точке определяется по графику  $H-Q$  (см. приложение В).

*Характеристиками насоса* называют графики зависимости напора, затраченной мощности и КПД от подачи. По зависимости  $H-Q$  и характеристике трубопровода находят рабочую точку насосной установки, а затем по зависимости  $\eta-Q$  подбирают требующийся насос.

Коэффициент полезного действия насоса выражают как произведение трех коэффициентов, характеризующих отдельные виды потерь энергии:

$$\eta_H = \eta_z \cdot \eta_{об} \cdot \eta_{мех},$$

где  $\eta_z = H_0 / H_m$  – гидравлический КПД насоса, т.е. отношение полезной мощности к сумме мощностей полезной и затраченной на преодоление гидравлических сопротивлений в насосе,  $\eta_z = 0,90-0,96$ ;  $\eta_{об} = Q_0 / Q_m$  – объемный КПД насоса, т.е. отношение полезной мощности к сумме мощностей полезной и теряемой вследствие внутренних утечек через зазоры и концевые уплотнения в насосе,  $\eta_{об} = 0,96-0,98$ ;  $\eta_{мех}$  – механический КПД характеризует потери в подшипниках энергии от механического трения и в уплотнениях насоса, а также механического трения перекачиваемой жидкости с неработающими поверхностями колес насоса,  $\eta_{мех} = 0,80-0,90$ .

### Расчетные формулы

По уровню воды в баке вычисляется объем  $V$ . Подача насоса (расход воды, м<sup>3</sup>/с):

$$Q = V / \tau, \quad (6.1)$$

где  $\tau$  – время по секундомеру, с.

Напор насоса, м:

$$H = (P_M + P_V) / (\rho g) + z, \quad (6.2)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $z$  – перепад высот между манометром и вакуумметром,  $P_M$ ,  $P_V$  – показания манометра и вакуумметра, Па.

Полезная мощность насоса, Вт:

$$N_n = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q. \quad (6.3)$$

Коэффициент полезного действия установки (полный), %:

$$\eta = 100 \cdot N_n / N, \quad (6.4)$$

где  $N$  – затраченная мощность (по ваттметру), Вт.

Число Рейнольдса в трубопроводе:

$$Re = d \cdot W / \nu, \quad (6.5)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода;  $W$  – средняя скорость:

$$W = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}. \quad (6.6)$$

Таблица 6.1 – Результаты измерений и вычислений

№ пп	$h_y$ дм	$\tau$ с	$P_M$ ат	$P_V$ ат	$N$ Вт	$Q$ м <sup>3</sup> /с	$H$ м	$N_n$ Вт	$\eta$ %	$W$ м/с	$Re$ -
1											
2											
...											

#### Контрольные вопросы

1. Принцип действия центробежного насоса.
2. Что такое подача и напор насоса?
3. Как рассчитать напор насоса.
4. Как рассчитать полезную мощность насоса?
5. Что такое полный коэффициент полезного действия установки, чему он равен?
6. Из чего складывается КПД насоса?
7. Что такое характеристики насоса? Для чего они используются?
8. Как зависят напор и КПД от подачи центробежного насоса?
9. Как определить КПД насосной установки в рабочей точке?

#### Лабораторная работа № 7

#### Исследование тарировочной зависимости водомерного сопла

##### Задание

1. Ознакомиться с установкой для исследования водомерного сопла и сделать ее рисунок с указанием составных частей (рис. 7.1).
2. Выполнить измерения величин  $h_y$ ,  $\tau$ ,  $\Delta h$  при уменьшении подачи насоса путем закручивания регулирующей задвижки.
3. Рассчитать расход, скорость, числа Рейнольдса в каждом опыте.
4. Найти эмпирический коэффициент в тарировочной зависимости.
5. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 7.1.
6. Построить графики вспомогательной и тарировочной зависимостей.

##### Методические указания

Одним из наиболее распространенных и удобных способов измерения расхода  $Q$  жидкости в напорных трубопроводах является измерение расхода по перепаду потенциальных напоров в сужающем (дроссельном) устройстве. В качестве таких устройств чаще всего применяются диафрагмы и сопла (рис. 7.1). В сужающем устройстве скорость потока, а следовательно, и кинетическая энергия увеличиваются в узком сечении, что приводит к уменьшению в этом сечении удельной потенциальной энергии, представляющей собой сумму

удельной потенциальной энергии сил тяжести (положения) и удельной потенциальной энергии давления  $p/\rho g$ . В результате появляется перепад напоров  $\Delta h$ , зависящий от расхода жидкости. Чем больше расход, а следовательно, и скорость потока, тем больше перепад  $\Delta h$ . Из уравнения Бернулли следует, что эта зависимость в квадратичной области сопротивления имеет вид:

$$Q = \alpha \cdot \sqrt{\Delta h}, \quad (7.1)$$

где  $\alpha$  – размерная константа, которая при больших числах Рейнольдса зависит только от параметров сопла.

Тарировка – проверка правильности показаний измерительных приборов по сравнению со стандартными значениями.

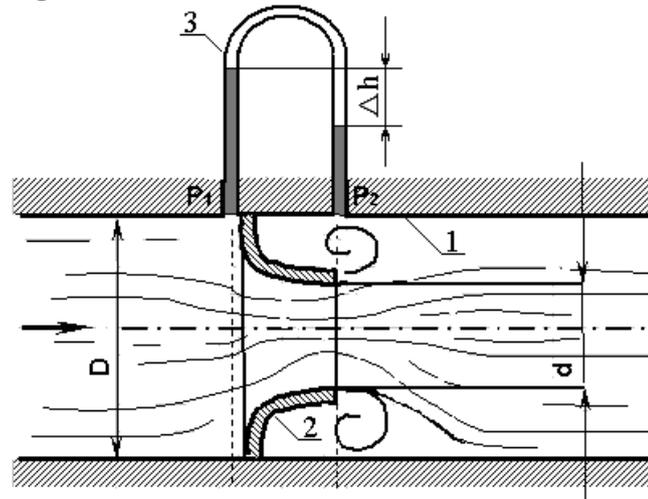


Рис. 7.1. Схема установки: 1 – труба, 2 – водомерное сопло, 3 – дифференциальный манометр

При выполнении лабораторной работы № 7 уменьшение скорости течения воды в трубопроводе достигается путем постепенного закрытия регулирующего вентиля. Необходимо выполнить не менее  $n \geq 10$  измерений. Расход, средняя скорость и число Рейнольдса рассчитываются как в лабораторной работе № 6.

$$Q = V / \tau, \quad W = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}, \quad Re = D \cdot W / \nu. \quad (7.2)$$

Прологарифмируем обе части равенства (7.1):

$$\lg Q = \lg \alpha + 0,5 \cdot \lg (\Delta h). \quad (7.3)$$

Введем обозначения:

$$q = \lg Q, \quad A = \lg \alpha, \quad h = \lg (\Delta h). \quad (7.4)$$

Перепишем (7.3) в виде линейной зависимости новых переменных:

$$q = f(h) = A + 0,5 \cdot h. \quad (7.5)$$

По данным лабораторного эксперимента методом наименьших квадратов найдем эмпирический параметр в формуле (7.5):

$$A = \left( \sum_{i=1}^n q_i - 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n h_i \right). \quad (7.6)$$

Теперь можем построить на рис. 7.2 график линейной зависимости  $f(h)$ . Экспериментальные точки находятся вблизи прямой. Тогда можем рассчитать эмпирический коэффициент в формуле (7.1):  $\alpha = 10^4$  и построить рис. 7.3.

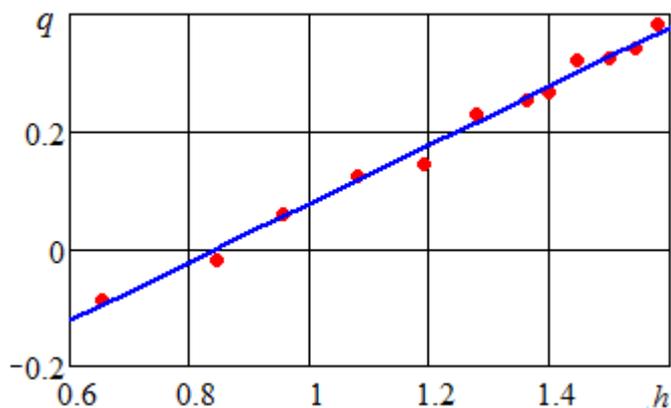


Рис. 7.2. Линейная зависимость (7.5) и экспериментальные точки

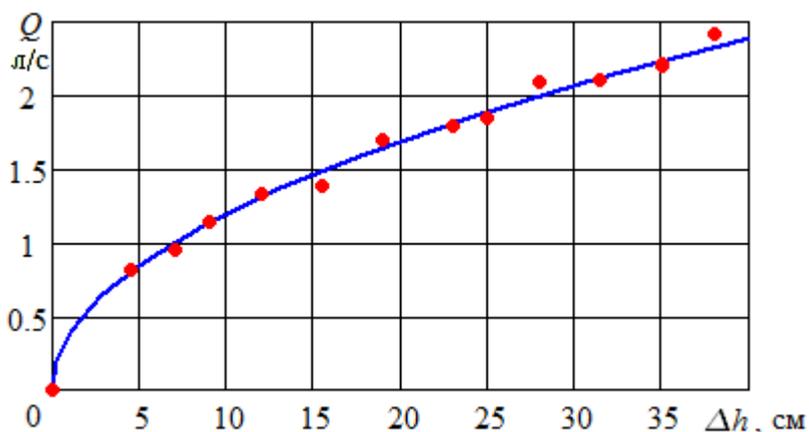


Рис. 7.3. Тарировочная кривая (линия) и экспериментальные точки

Результаты измерений и вычислений следует занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты измерений и вычислений

№ пп	$h_v$ дм	$\tau$ с	$\Delta h$ см	$V$ м <sup>3</sup>	$Q$ л/с	$\lg(\Delta h)$ -	$\lg Q$ -	$W$ м/с	$Re$ -
1									
2									
3									
...									
n									
Σ									

#### Контрольные вопросы

1. Что такое тарировка измерительного прибора?
2. Как связаны расход и перепад напоров в сопле?
3. Зачем в лабораторной работе используется логарифмирование?
4. Каким образом можно рассчитать эмпирический коэффициент в тарировочной зависимости?
4. При каких числах Рейнольдса справедлива тарировочная зависимость?
5. Как определить, какой режим течения был реализован в опытах?

## ЛИТЕРАТУРА

### Нормативные документы

1. ГОСТ Р 53288-2008. Весы неавтоматического действия. Ч.1. Метрологические и технические требования. Испытания. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 декабря 2008 г. № 739-ст.
2. ГОСТ Р 54806-2011. Насосы центробежные. Технические требования. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1170-ст.
3. ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2014 г. № 2023-ст.
4. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 ноября 2016 г. № 1570-ст.

### Рекомендуемые учебные пособия

1. Кожухар, В. М. Основы научных исследований: учеб. пособие / В. М. Кожухар. – Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2010. – 216 с.
2. Шкляр, М. Ф. Основы научных исследований: учеб. пособие для бакалавров / М. Ф. Шкляр. – Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2012. – 244 с.
3. Лаптева, Н. Е. Центробежные насосы: учеб. пособие / Н. Е. Лаптева. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. – 59 с.
4. Цаплин, А. И. Основы научных исследований в технологии машиностроения: учеб. пособие / А. И. Цаплин. – Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 228 с.
5. Думлер, Е. Б. Погружные установки центробежных насосов: учеб. пособие / Е. Б. Думлер, Р. И. Вахитова, К. Р. Уразаков. – Альметьевск: Типография АГНИ, 2017. – 120 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

**Таблица П.А.1 – Величины коэффициента Стьюдента**

Число степеней свободы $f=n-1$	Доверительная вероятность $\gamma$			
	0,90	0,95	0,98	0,99
1	6,314	12,706	31,821	63,657
2	2,920	4,303	6,965	9,925
3	2,353	3,182	4,541	5,841
4	2,132	2,776	3,747	4,604
5	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,833	2,262	2,821	3,250
10	1,812	2,228	2,764	3,169
11	1,796	2,201	2,718	3,106
12	1,782	2,179	2,681	3,055
13	1,771	2,160	2,650	3,012
14	1,761	2,145	2,624	2,977
15	1,753	2,131	2,602	2,947
16	1,746	2,120	2,583	2,921
17	1,740	2,110	2,567	2,898
18	1,734	2,101	2,552	2,878
19	1,729	2,093	2,539	2,861
20	1,725	2,086	2,528	2,845
21	1,721	2,080	2,518	2,831
22	1,717	2,074	2,508	2,819
23	1,714	2,069	2,500	2,807
24	1,711	2,064	2,492	2,797
25	1,708	2,060	2,485	2,787
26	1,706	2,056	2,479	2,779
27	1,703	2,052	2,473	2,771
28	1,701	2,048	2,467	2,763

## Приложение Б

Таблица П.Б.1 - Коэффициент кинематической вязкости воды при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
5	1,519	18	1,065
6	1,477	19	1,034
7	1,434	20	1,004
8	1,392	21	0,984
9	1,349	22	0,963
10	1,307	23	0,943
11	1,277	24	0,923
12	1,246	25	0,903
13	1,216	26	0,882
14	1,186	27	0,862
15	1,156	28	0,842
16	1,125	29	0,821
17	1,095	30	0,801

Таблица П.Б.2. Справочные значения коэффициентов для отверстий и насадков

№ п/п	Вид отверстия или насадка	Коэффициенты			
		$\varepsilon$	$\varphi$	$\mu$	$\zeta$
1	Круглое отверстие	0,64	0,97	0,62	0,06
2	Цилиндрический насадок (внешний)	1,0	0,82	0,82	0,5
3	Конический сходящийся насадок	0,98	0,96	0,94	0,09
4	Конический расходящийся насадок при $\beta = 7^\circ$	1,0	0,45	0,45	3 ÷ 4
5	Конoidalный насадок	1,0	0,98	0,98	0,04

Примечание. Значения коэффициентов  $\varepsilon$  и  $\varphi$  относятся к выходному отверстию.

## Приложение В

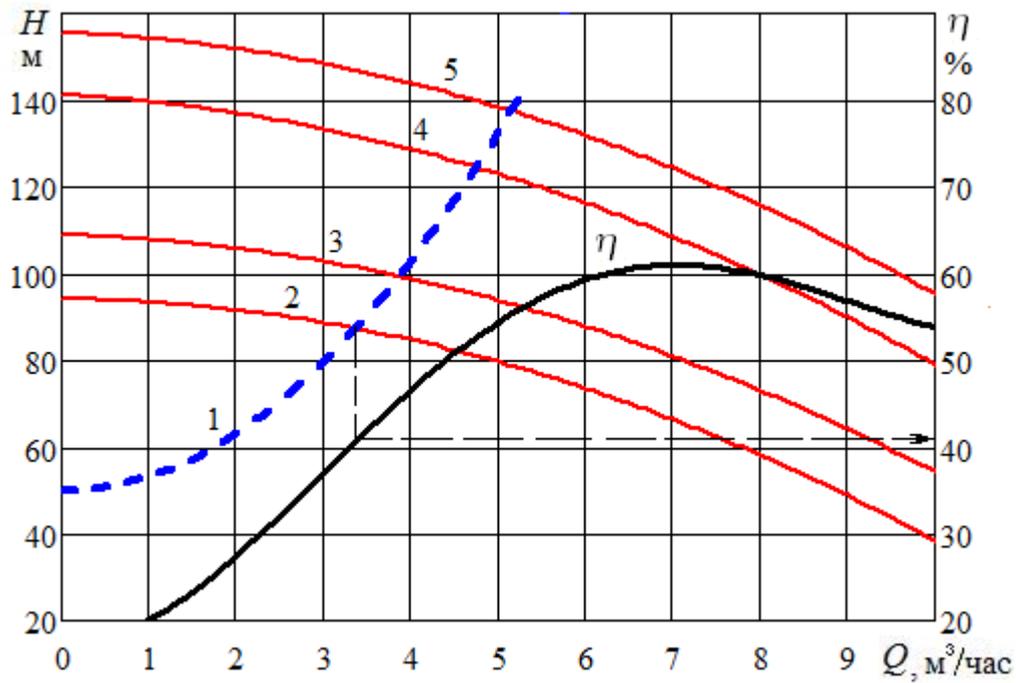


Рис. П.В.1. Определение КПД насосной установки в рабочей точке:  
 1 – характеристика трубопровода; 2 – напорная характеристика погружного насоса ЭЦВ-4-6.5-70; 3 – ЭЦВ-4-6.5-85; 4 – ЭЦВ-4-6.5-115; 5 – ЭЦВ-4-6.5-130

*Учебное издание*

**Владимир Аркадьевич Наумов**

# **МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Редактор *Г.Е. Смирнова*

Подписано в печать 8.02.2018 г. Формат 60x84 (1/16).  
Уч.-изд. л. 1,8. Печ. л. 1,8. Тираж 30 экз. Заказ № 15.

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
236022, Калининград, Советский проспект, 1