

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Химические технологии нефтегазового комплекса»

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ЧАСТЬ I
ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ

Методические указания к лабораторным занятиям

Ростов-на-Дону

ДГТУ

2018

УДК 66.02/07 (076.5)

Составители: И.Ю. Жукова, И.И. Кашпаров, А.И. Собчинский

Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 1.
Основы гидравлики: метод. указания к лаб. занятиям. –
Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2018. – 42 с.

Содержат теоретический материал, методики выполнения лабораторных работ, комплекс вопросов для проверки знаний обучающихся на лабораторных занятиях. Составлены в соответствии с программой дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии».

Предназначены для обучающихся направления 18.03.01 Химическая технология очной и заочной форм обучения.

УДК 66.02/07 (076.5)

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Научный редактор канд. хим. наук, Мишуров В.И.
Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Химические технологии
нефтегазового комплекса» д-р техн. наук, профессор И.Ю. Жукова

В печать 23.11.2018 г.
Формат 60×84/16. Объем 2,6 усл. п. л.
Тираж 50 экз. Заказ № 1401.

Издательский центр ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный
технический университет, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Техника безопасности	5
Элементы научных исследований при выполнении студентами лабораторных работ	6
Методические указания к лабораторным работам	9
Лабораторная работа № 1. Измерение давления	9
Лабораторная работа № 2. Измерение температур	12
Лабораторная работа № 3. Определение средней изобарной теплоемкости воздуха	17
Лабораторная работа № 4. Изучение физических свойств жидкости	21
Лабораторная работа № 5. Кинетика процесса осаждения	28
Лабораторная работа № 6. Определение вязкости жидкости методом стокса ...	32
Лабораторная работа № 7. Истечение жидкости через отверстия и насадки	35
Приложение	39
Литература	42

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Процессы и аппараты химической технологии» является инженерной дисциплиной, представляющей собой важный раздел теоретических основ химической технологии. В нем изучаются основные процессы и аппараты химических производств, и основные закономерности протекания технологических процессов. Он играет очень важную роль в подготовке студентов химико-технологических специальностей. Эффективность освоения этой учебной дисциплины в значительной мере зависит от содержания и постановки лабораторного практикума.

Настоящее пособие является учебно-методическим руководством для выполнения лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» студентами направления 18.03.01 «Химическая технология». А также для студентов других направлений подготовки, изучающих данную дисциплину.

Лабораторный практикум состоит из двух частей, содержащих по 7 лабораторных работ, являющихся вариациями стандартных работ адаптированных научным коллективом кафедры «Химические технологии нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (ДГТУ).

Целью каждой лабораторной работы является более глубокое усвоение материала по соответствующему разделу курса, а также приобретение необходимых навыков при проведении измерений, постановке эксперимента и обработке его результатов.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ,

НЕОБХОДИМО:

1. Пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в соответствующем журнале;
2. Досконально изучить устройство лабораторных стендов;
3. Проверить заземление лабораторных стендов.

СТРОГО ВОСПРЕЩАЕТСЯ:

1. Касаться проводников и незащищенных частей аппаратуры, находящихся под напряжением;
2. Включать в сеть лабораторную установку без разрешения преподавателя и в его отсутствие;
3. Оставлять без наблюдения включенную лабораторную установку;
4. Касаться нагретых поверхностей установок;
5. При работе с насосами превышать установленное давление;
6. Менять регулировку приборов, открывать или закрывать краны установок в отсутствие преподавателя;
7. Загромождать стол лабораторной установки одеждой, портфелями, книгами и другими вещами, не относящимися к работе;
8. Принимать пищу в научной лаборатории.

ЕСЛИ ПРОИЗОШЕЛ НЕСЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ – НЕМЕДЛЕННО:

1. Отключить электропитание лаборатории рубильником;
2. Оказать первую помощь пострадавшему;
3. Вызвать по телефону «03» скорую помощь.

ЭЛЕМЕНТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СТУДЕНТАМИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы студенты выполняют небольшими бригадами от 2 до 4 человек, причем условия эксперимента для каждой бригады изменяются, что не может не сказываться на результате. Это обеспечивает необходимую самостоятельность студентов при работе.

Готовясь к защите лабораторных работ, студенты обязательно отвечают на контрольные вопросы, имеющиеся в тексте методических указаний, т.к. преподаватель ведет опрос в основном по этим же вопросам. Работая с контрольными вопросами, студент должен обращаться к литературе, конспектам лекций, таблицам и диаграммам, он анализирует полученные результаты, связывая их с условиями эксперимента, и сталкивается, таким образом, с элементами научных исследований (ЭНИ).

ПОРЯДОК ДЕЙСТВИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ СТУДЕНТАМИ:

При выполнении лабораторных работ студентам рекомендуется следующий порядок действий:

1. Ознакомиться с требованиями техники безопасности.
2. Усвоить цели и задачи работы.
3. Изучить устройство лабораторной установки, порядок выполнения работы (включение и регулирование), методику эксперимента, связь с теоретическими положениями. Подготовить описание установки и журнал наблюдений.
4. Изучить справочную литературу, рекомендуемую к данной лабораторной работе.
5. Отчитаться перед преподавателем о готовности к выполнению работы и получить разрешение на выполнение.
6. Во время проведения опыта, студент, должен выполнить эксперимент, оценивая достоверность и точность каждой измеренной цифры, ее значение в работе в целом.

Пуск установки производится только с разрешения преподавателя и в его присутствии. В процессе проведения опыта каждый студент заносит результаты измерений в свою таблицу наблюдений, которая затем подписывается преподавателем. Таблица наблюдений является основным документом, удостоверяющим участие студента в выполнении работы, и должна сохраняться до получения защиты по этой работе.

7. Показать результаты преподавателю для проверки.

8. Выполнить обработку материалов эксперимента: рассчитать результаты, построить диаграммы или графики, оценить погрешность результатов, обдумав выводы увязать их с имеющимся заданием в работе.

9. Оформить отчет по лабораторной работе на основе инструкции и таблицы наблюдений. Справочные данные имеются в приложении к практикуму, а также в учебниках и справочниках по теплотехнике, процессам и аппаратам химической технологии, органической химии. Отчет должен включать следующие разделы:

- название и номер работы;
- задание с указанием целей работы;
- основные теоретические положения;
- схема экспериментальной установки и ее краткое описание;
- таблица наблюдений;
- математическая обработка опытных данных;
- указанные в задании диаграммы и графики и итоговые таблицы;
- выводы и обобщения.

Отчет следует оформить к следующему лабораторному занятию. При отсутствии отчета студент к выполнению следующей лабораторной работе не допускается.

10. При подготовке к защите отчета, повторно, на более глубоком уровне изучается теоретический материал и лабораторная установка. Особое внимание при этом студенты должны обращать на вопросы взаимной увязки между изучаемым материалом и другими разделами курса. Студенты должны знать ответы на контрольные вопросы.

11. Предъявить отчет преподавателю на проверку.

12. Защитить отчет перед преподавателем.

Защиты по лабораторным работам проводятся непрерывно в течение семестра по мере их выполнения. Работа считается принятой, если она выполнена в соответствии с указаниями настоящего руководства; получены достоверные результаты, и студент при защите обнаружил знание и понимание схемы установки, методики эксперимента, а также соответствующих разделов теории.

Для квалифицированного ответа на поставленные в инструкции контрольные вопросы студент должен не только изучить инструкцию, курс лекций или учебник, но и на основе этого материала уметь делать самостоятельные умозаключения.

Перечень работ и последовательность их выполнения устанавливаются преподавателем, исходя из объема курса, количества часов, предусмотренных учебным планом для этой дисциплины, а также возможностей лаборатории.

ЭЛЕМЕНТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ, МЕХАНИКЕ И ГИДРОМЕХАНИКЕ:

Лабораторная работа № 1. В ходе выполнения работы студент изучает приборы для измерения давления – важнейшего термодинамического параметра. Строит поправочную кривую для пружинных измерительных приборов. Устанавливает связь между основными единицами измерения давления.

Лабораторная работа № 2. В ходе выполнения работы студент изучает основные приборы для измерения температуры. Находит погрешности определения температуры этими приборами в сравнении с ртутным термометром. Устанавливает взаимосвязь между единицами измерения температуры.

Лабораторная работа № 3. Студент анализирует, зависимость средней изобарной теплоемкости воздуха от его скорости в канале экспериментальной установки. Затем устанавливает взаимосвязь между изобарной и изохорной теплоемкостями воздуха. Сопоставляет справочные и найденные опытные значения.

Лабораторная работа № 4. В ходе выполнения работы студент изучает основные физические свойства жидкости. Приборы для измерения основных свойств жидкости. Сопоставляет справочные и найденные в опыте значения.

Лабораторная работа № 5. Студент изучает кинетику процесса свободного осаждения твердых частиц шарообразной формы под действием силы тяжести. Научится проводить построение графических зависимостей и сравнить его с теоретическими данными. Находит погрешности определения.

Лабораторная работа № 6. Студент определяет вязкости различных жидкостей при помощи метода Стокса. При выполнении работы находит основные зависимости, сопоставляет справочные и найденные значения.

Лабораторная работа № 7. В ходе выполнения работы студент экспериментально определяет коэффициенты расхода при истечении воды через различные отверстия. Экспериментально определяет время опорожнения сосуда и сопоставить полученные результаты с теоретическими.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ГИДРАДИНАМИКЕ

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы – ознакомиться с физическими принципами, лежащими в основе контактных методов измерения давления. Изучить устройство и принцип действия основных контактных приборов и приобрести практические навыки работы с ними.

Задание

1. Измерить несколько величин разрежения в баллоне водяным и пружинным вакуумметрами.

2. По показаниям водяного вакуумметра и барометра определить соответствующие значения абсолютного давления в баллоне в мм рт.ст. Выразить эти давления в Паскалях, Барах, технических атмосферах и физических атмосферах.

3. По данным водяного и пружинного вакуумметра построить поправочную кривую для пружинного прибора.

Описания экспериментальной установки

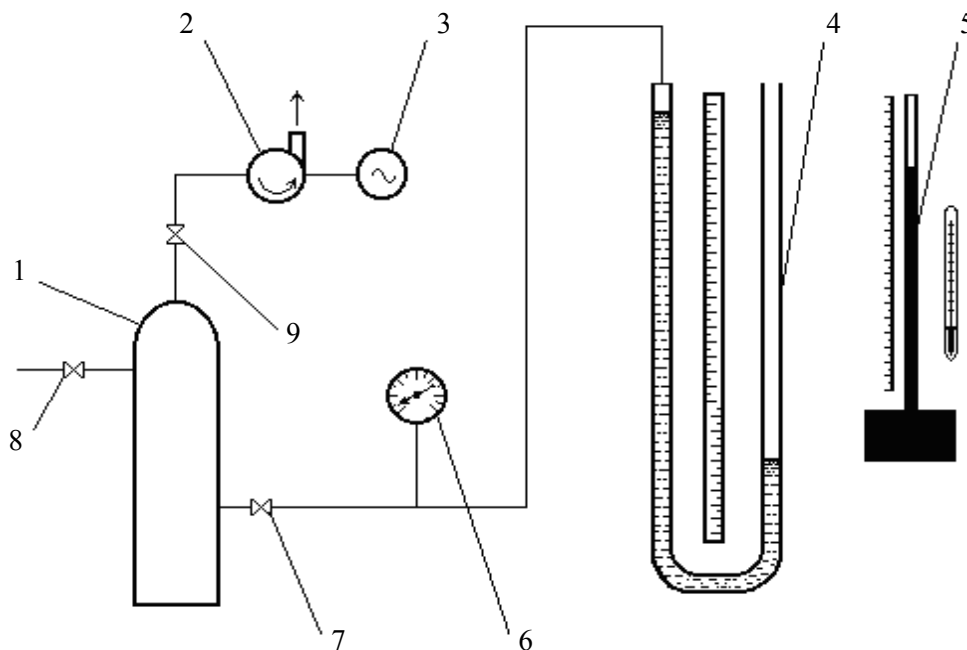


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения давления:

- 1 – баллон; 2 – вакуумнасос; 3 – электродвигатель; 4 – водяной вакуумметр;
5 – барометр; 6 – пружинный вакуумметр; 7, 8, 9 – вентили регулировки

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Установка включает газовый баллон высокого давления **1**, снабженный спускным вентилем **8**. Вакуумный насос поршневого типа **2**, электродвигатель **3**, приводящий в действие вакуумный насос, U-образный стеклянный вакуумметр **4** и механический вакуумметр **6**, ртутный барометр **5** снабженный градусником и поправочной таблицей, воздушные коммуникации с вентилями **7**, и **9**.

Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к проведению опыта необходимо убедиться в том, что вентили воздушных коммуникаций **7** и **9** открыты, а вентиль вакуумного баллона **8** закрыт. Затем нужно запустить вакуумный насос **2**. По достижению в баллоне разряжения не более 2,5 мм вод.ст., необходимо быстро закрыть вентиль **9** и отключить насос.

Первый опыт заключается в измерении показаний всех вакуумметров и барометра.

Для проведения второго опыта осторожно открыть вентиль **8** и снизить разряжение в баллоне примерно на 0,5 мм вод.ст. Затем вентиль **8** закрыть и вторично записать показания вакуумметров.

Последующие опыты проводят так же, как и второй. Всего должно быть сделано 5 замеров, причем пятый при разряжении в баллоне ~ 0,5 мм вод.ст., все данные необходимо занести в табл.1 наблюдений.

Таблица 1

Таблица наблюдений

Величина		Единица физической величины	Значения в опытах				
Наименование	Обозначение		1	2	3	4	5
Разряжение по водяному вакуумметру	$h_{вод}$	мм вод.ст.					
Разряжение по пружинному вакуумметру	$h_{пр}$	мм рт.ст.					
Атмосферное давление	B_t	мм рт.ст.					
Температура окружающего воздуха	t	°C					

Обработка экспериментальных данных

1. Привести показания барометра к 0 °C, воспользовавшись вспомогательным термометром и таблицей поправок, приложенных к барометру:

$$B = B_t - A$$

где A – численное значение поправки определяется по таблице, приложенной к барометру в зависимости от t и B_t

2. Для каждого опыта вычисляют значения абсолютного давления в баллоне p по формуле

$$p = B - h_{\text{вод}}$$

причем B и $h_{\text{вод}}$ должны быть предварительно выражены в одних и тех же единицах (мм рт.ст.). Значение показаний водяного вакуумметра необходимо перевести в мм рт.ст. (табл. П 1 перевода приведена в **Приложении**).

3. Абсолютное давление в баллоне выражаем в других часто используемых единицах измерения (Паскалях, барах, технических атмосферах и физических атмосферах). Перевод осуществляем по формулам:

$$p = p \cdot 133,3 \text{ Па}$$

$$p = p \cdot 1,333 \cdot 10^{-3} \text{ бар}$$

$$p = p \cdot 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ ат}$$

$$p = p \cdot 1,316 \cdot 10^{-3} \text{ физ.ат}$$

4. В системе координат $h_{\text{вод}} - h_{\text{пр.}}$ по опытным данным необходимо построить поправочную кривую для пружинного вакуумметра. Величины разрежения откладываемые по осям координат, должны быть выражены в единицах шкалы пружинного вакуумметра, т.е. в мм рт.ст. Масштабы по осям координат следует выбрать одинаковыми.

Контрольные вопросы

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для определения давления в работе?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания приборов от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Дайте количественное определение давления.
2. Что такое давление с точки зрения термодинамики?
3. Что такое давление с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
4. С помощью, какого прибора измеряется атмосферное давление?
5. Чему равна величина абсолютного давления?
6. Перечислите основные единицы измерения давления. Какая между ними взаимосвязь?
7. Что такое разрежение и избыточное давление, и как они связаны с абсолютным давлением?

8. Можно ли рассматривать разрежение или избыточное давление в качестве параметра состояния рабочего тела, и почему?
9. Как должен быть устроен прибор для непосредственного измерения абсолютного давления?
10. Как различаются приборы для измерения давления по их назначению?
11. Решите пример типа: избыточное давление $p_n = 2$ ат, атмосферное $B = 756$ мм рт.ст., чему равно абсолютное давление в барах и Паскалях?
12. На чем основан принцип измерения давления жидкостными и механическими приборами?
13. Как зависит определяемое давление от свойств рабочей жидкости при измерении избыточного давления (разрежения)?
14. Какова примерно максимально возможная величина разрежения?
15. Разъясните практическое назначение поправочной кривой пружинного прибора, построенной в этой работ?
16. Перечислите основные приборы для измерения давления?
17. Устройство и принцип работы U-образного манометра?
18. Устройство и принцип работы чашечного манометра?
19. Устройство и принцип работы микроманометра?
20. Устройство и принцип работы манометра с одновитковой трубчатой пружиной?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

Цель работы – ознакомиться с физическими принципами, лежащими в основе контактных методов измерения температур. Изучить устройство и принцип действия основных контактных приборов и приобрести практические навыки работы с термометрами различных типов.

Задание

1. С помощью ртутного термометра определить три значения температуры воды в термостате.
2. Измерить те же температуры при помощи термоэлектрического пирометра и электрического термометра сопротивления.
3. Найти погрешности определения температуры пирометром и термометром сопротивления в сравнении с ртутным термометром.
4. По данным п. 1 определить температуру воды в термостате по шкале Кельвина.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2) включает термостат, ртутный термометр, термоэлектрический пирометр и термометр сопротивления.

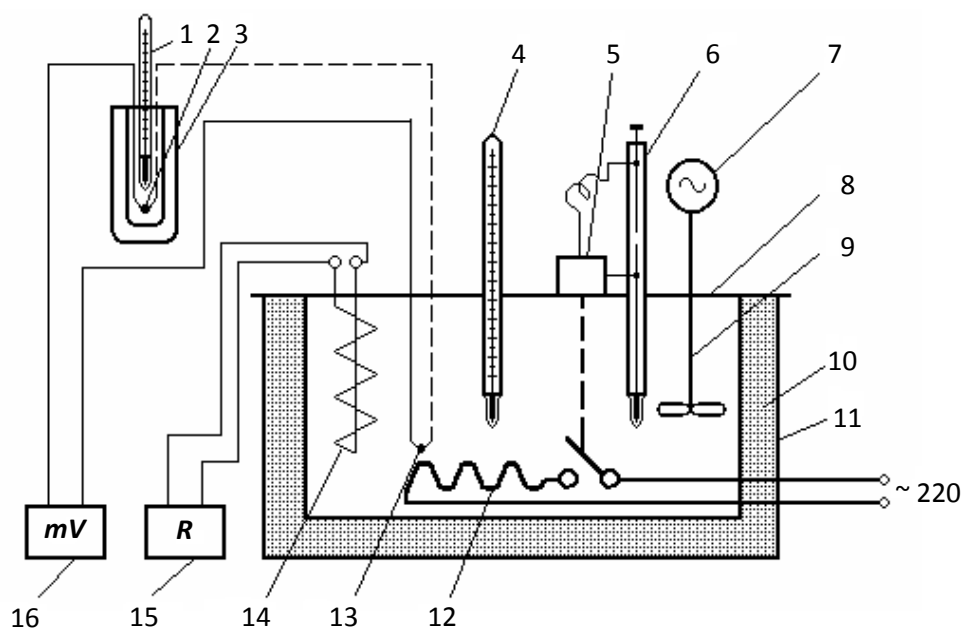


Рис.2. Экспериментальная установка для измерения температур:

1 – ртутный термометр; 2 – холодный спай термопары; 3 – сосуд Дьюара;
 4 – ртутный термометр; 5 – реле; 6 – контактный термометр; 7 – электромотор мешалки; 8 – крышка термостата; 9 – мешалка; 10 – тепловая изоляция;
 11 – корпус термостата; 12 – электронагреватель; 13 – горячий спай термопары;
 14 – чувствительный элемент термометра сопротивления; 15 – прибор для измерения электрического сопротивления; 16 – милливольтметр

Термостат устроен следующим образом: прямоугольный корпус **11** с дном имеет двойные стенки, между которыми заложена тепловая изоляция **10**. Во внутренний бачок залита жидкость (вода), температуру которой необходимо измерять. Бачок закрыт крышкой **8**, на которой смонтированы все узлы прибора: электронагреватель **12**, мешалка **9** с электромотором **7**.

Электронагреватель **12** мощностью около 1 кВт служит для нагрева воды. При помощи мешалки **9**, приводимой во вращение электромотором **7**, достигается равномерность температуры воды во всем ее объеме. Контактный термометр **6** и реле **5** образуют терморегулятор. Назначение терморегулятора состоит в том, чтобы в течение длительного времени поддерживать температуру воды в термостате на заданном уровне. Этот уровень задается контактным термометром.

Контактный термометр, в отличие от обычного ртутного термометра, имеет в верхней части капилляра металлическую проволочку. Эта проволочка под действием вращающегося магнетика может перемещаться вдоль капилляра. Таким образом, торец проволочки можно установить на любом делении шкалы термометра и тем самым задать желаемый уровень температуры воды в термостате. Контактный термометр снабжен вспомогательной шкалой, по которой для удобства наблюдения перемещается указатель (гайка), положение

которой на вспомогательной шкале соответствует положению торца проволоочки на основной шкале контактного термометра. Следует заметить, что контактный термометр является грубым прибором и для измерения температуры не применяется.

Процесс поддержания постоянной температуры воды в термостате заключается в следующем. При включенном нагревателе температура воды поднимается до уровня, заданного контактным термометром, как только ртутный столбик коснется торца проволоочки, замыкается цепь реле, и реле отключает нагреватель. Затем, вследствие теплообмена с окружающей средой, температура воды падает, ртутный столбик в контактном термометре опускается, цепь реле размыкается, и снова включается нагреватель. Таким образом температура воды автоматически поддерживается постоянной, колеблясь около заданного уровня с амплитудой примерно $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$,

Для измерения температуры воды экспериментальная установка снабжена соответствующими термометрами. Ртутный термометр **4** с ценой деления $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ помещен в защитную гильзу.

Термоэлектрический пирометр включает хромель-копелевую термопару, лабораторный потенциометр **16** и сосуд Дьюара **3** с тающим льдом или холодной водой. Холодный спай, термопары **2** помещен в сосуд Дьюара. Там же установлен и ртутный термометр **1** для измерения температуры холодного спая (при отсутствии льда). Горячий спай термопары **13** находится в воде термостата. Термометр сопротивления содержит чувствительный элемент **14** из платиновой проволоки, медные соединительные провода и мост **15**.

Порядок выполнения работы

Контактным термометром задается первое значение температуры, выбранное для измерения. Включается термостат (нагреватель и мешалка). Выжидается момент, когда сработает реле, о чем можно судить по падению стрелки амперметра в цепи нагревателя или по характерному щелчку реле. Если реле срабатывает, то заданная температура достигнута и через ~ 5 минут, учитывая тепловую инерцию приборов, можно приступить к измерениям.

Фиксируются и заносятся в табл. 2 наблюдений показания приборов. До перехода к следующему опыту необходимо показания термоэлектрического пирометра и термометра сопротивления, выраженные соответственно в мВ и Ом перевести в $^{\circ}\text{C}$ и сопоставить эти значения с показанием ртутного термометра. Такое сопоставление позволяет избавиться от случайных ошибок в измерениях.

Таблица наблюдений

Величина		Размерность	Значения в опытах		
Наименование	Обозначение		1	2	3
Показания жидкостного термометра	t	$^{\circ}\text{C}$			
Показания термоэлектрического пирометра	E	мВ			
Показания термометра сопротивления	R	Ом			
Температура холодного спая термопары	t_0	$^{\circ}\text{C}$			

По окончании первого опыта на контактном термометре устанавливается новое, более высокое, значение температуры, и все перечисленные выше операции повторяются. Всего нужно проделать 3 опыта, повышая температуру каждый раз примерно на 5°C .

Обработка экспериментальных данных

1. Определяют значения температуры по двум измерительным приборам:

измеренные термоэлектрическим пирометром

$$t_n = 15 E + t_0;$$

измеренные термометром сопротивления

$$t_c = 2,54 (R - 100).$$

2. Погрешности измерения температуры пирометром и термометром сопротивления в сравнении с ртутным термометром находятся соответственно из формул:

$$\Delta_n = \frac{t_n - t}{t} \cdot 100 \%; \quad \Delta_c = \frac{t_c - t}{t} \cdot 100 \%;$$

3. Абсолютная температура воды подсчитывается по формуле:

$$TK = t^{\circ}\text{C} + 273,15$$

Контрольные вопросы

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для определения температуры в работе?

6. Когда производится запись показаний термометров?
7. Зависят ли показания термоэлектрического пирометра от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Что такое температура?
2. Что такое температура с точки зрения термодинамики?
3. Что такое температура с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
4. Что такое эмпирическая температура, а что такое абсолютная?
5. Перечислите основные мировые единицы измерения температуры. Как они соотносятся со шкалой Цельсия?
6. В чем принципиальное различие между шкалой Цельсия и Кельвина? Напишите зависимость между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия.
7. Может ли быть параметром состояния рабочего тела температура, измеряемая в градусах Цельсия или градусах Кельвина?
8. Каково назначение и устройство термостата? Как протекает процесс поддержания постоянной температуры в термостате?
9. Какие контактные приборы для измерения температуры вы знаете?
10. Какие бесконтактные приборы для измерения температуры есть?
11. На каких законах основывается работа бесконтактных методов измерения температуры?
12. Какой бесконтактный метод измерения температуры использует зависимость спектральной энергетической яркости тела от T ?
13. Принцип действия и устройство ртутного термометра? Какова погрешность прибора?
14. Принцип действия и устройство манометрического термометра? Какова погрешность прибора?
15. Принцип действия и устройство термоэлектрического пирометра? Какова погрешность прибора?
16. Как измеряется температура термоэлектрическим пирометром, если температура холодного спая не равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?
17. Принцип действия и устройство термометра сопротивления? Какова максимальная погрешность прибора?
18. Каким свойством должны обладать проводники, используемые для изготовления чувствительного элемента термометра сопротивления?
19. Принцип действия и устройство контактного термометра? Какова погрешность прибора?
20. Разъясните практическое назначение поправочной таблицы для хромель-копелевой термопары?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы – ознакомиться с физическими принципами, определения средней изобарной теплоемкости воздуха экспериментальным путем и сравнить ее со справочным значением.

Задание

1. Экспериментальным путем определить массовую среднюю изобарную теплоемкость воздуха.
2. Полученное значение теплоемкости сравнить со справочным, найти расхождение в процентах и проанализировать причины погрешности опытов.
3. По данным п.1 вычислить мольную и объемную изобарные, а также мольную, массовую и объемную изохорные теплоемкости воздуха.

Описания экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Суть экспериментального определения изобарной теплоемкости c_{pm} состоит в следующем. Воздух вентилятором **1** просасывается через стеклянную теплоизолированную трубку **2** и воспринимает теплоту от электронагревателя **3**, помещенного внутри нее. При этом температура воздуха увеличивается на величину Δt , которая измеряется хромель-копелевой термопарой **4** и цифровым прибором **5**. Холодный и горячий спай термопары расположены соответственно до и после экспериментального участка. Расход нагреваемого воздуха измеряется с помощью ротаметра **6**, установленного на входе в экспериментальный участок.

Ротаметр представляет собой прозрачную трубку с внутренним коническим расширяющимся кверху каналом, внутри которого свободно движется поплавков. Поток воздуха, проходя через кольцевой зазор между поплавком и трубкой, дросселируется. Возникающий при этом перепад давлений поддерживает поплавков во взвешенном состоянии на высоте, пропорциональной расходу. Таким образом, имея тарировочную кривую или аналитическую зависимость $V = f(h)$, по высоте подъема поплавка h определяют объемный расход V .

Необходимые для определения плотности воздуха на входе в экспериментальный участок давление и температура измеряются барометром и жидкостным термометром. Количество воспринимаемого воздухом тепла при установившемся режиме равно мощности электронагревателя, которая измеряется амперметром **7** и вольтметром **8** и задается ЛАТРОм **9**. Чтобы можно было приравнять мощность нагревателя и количество тепла, полученное воздухом, необходимо тщательно теплоизолировать экспериментальный участок, исключив тем самым потери тепла в окружающее пространство. Роль

тепловой изоляции выполняет оболочка, в которой создан вакуум, а внутренняя поверхность посеребрена.

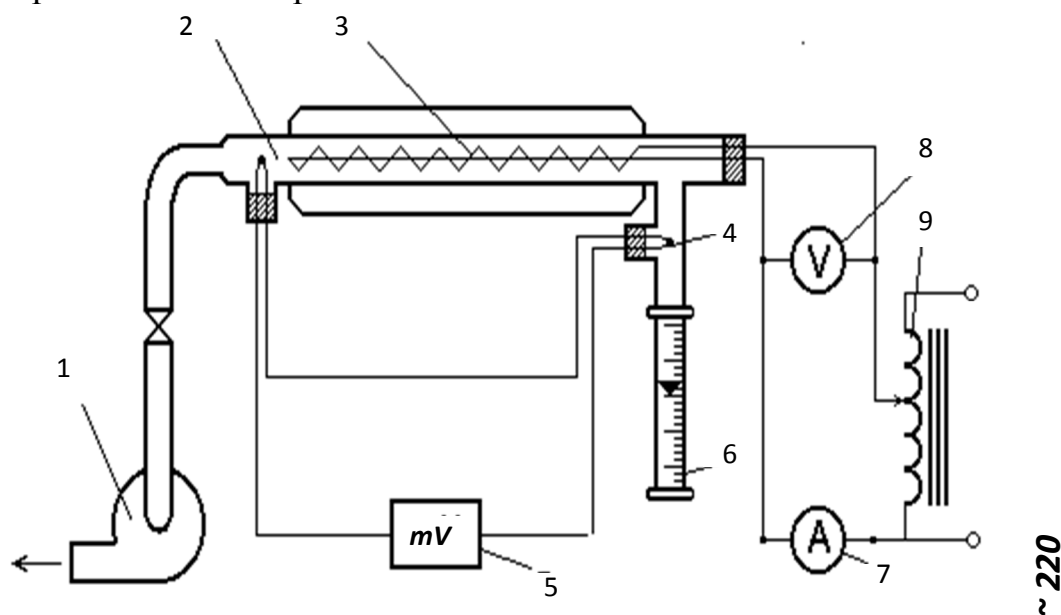


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения температур:

1 – вентилятор; 2 – теплоизолированная трубка; 3 – электронагреватель;
4 – термопара; 5 – милливольтметр; 6 – ротаметр; 7 – амперметр;
8 – вольтметр; 9 – автотрансформатор.

Порядок выполнения работы

Включается вентилятор и в зависимости от типа привода частотой вращения (двигатель постоянного тока) или заслонкой на воздухопроводе (двигатель переменного тока) устанавливается такой расход воздуха, чтобы поплавков ротаметра находился между 3 и 4 делениями.

Тумблером (26 В) включается питание цифровых вольтметра и амперметра. ЛАТРом устанавливается напряжение примерно 60 В, при этом ток в нагревателе не превышает 0,5 А.

После выхода установки на стационарный тепловой режим, о чем свидетельствует неменяющееся в течение 5 минут значение термоЭДС, показания приборов записываются в табл. 3 наблюдений. Затем, изменив расход воздуха ориентировочно на 1 деление ротаметра, опыт повторяется в той же последовательности.

По завершении работы сначала отключается нагреватель. И только убедившись, что температура на выходе из экспериментального участка снизилась до комнатной (термоЭДС близка к нулю), можно выключить вентилятор.

Таблица наблюдений и вычислений

Величина		Размерность	Значения в опытах	
Наименование	Обозначение		1	2
Показания ротаметра	h	дел.		
Расход воздуха	V	м ³ /час		
Давление воздуха перед ротаметром	P_0	мм рт.ст.		
Температура воздуха перед ротаметром	t_1	°C		
Падение напряжения на электронагревателе	U	В		
Ток в электронагревателе	I	А		
Приращение температуры воздуха в экспериментальном участке	E	мВ		

Обработка экспериментальных данных

1. По показаниям амперметра и вольтметра рассчитывается мощность нагревателя, кВт, которая при стационарном режиме равна теплоте, полученной воздухом:

$$Q = U \cdot I \cdot 10^{-3}$$

2. Плотность воздуха перед ротаметром определяется по уравнению Менделеева – Клапейрона, кг/м³

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \cdot T_0}$$

где P_0, T_0 – давление и абсолютная температура воздуха перед ротаметром; R – газовая постоянная ($R = 287$ Дж/кг·К).

3. Часовой объемный расход воздуха, м³/час вычисляется по формуле

$$V = 0,64 \cdot h + 0,95$$

4. Приращение температуры в экспериментальном участке, °C, находится по термоЭДС

$$\Delta t = 15 \cdot E$$

5. Средняя изобарная теплоемкость воздуха равна

$$c_{pm} = \frac{3600 \cdot Q}{V \cdot \rho \cdot \Delta t}, \text{ кДж/(кг·К)}$$

6. Справочное значение теплоемкости воздуха, кДж/(кг·К), рассчитывается по уравнению

$$c_{pm}^{сnp} = 0,996 + 0,93 \cdot 10^{-4} (t_1 + t_2),$$

где температура в конце процесса (на выходе из экспериментальной установки) $t_2 = t_1 + \Delta t$.

7. Погрешность опыта составляет

$$\Delta = \frac{c_{pm}^{cnp} - c_{pm}}{c_{pm}^{cnp}} \cdot 100$$

8. Мольная изобарная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)

$$\mu c_p = c_p \cdot \mu = c_p \cdot 29$$

9. Объемная изобарная теплоемкость, кДж/(нм³·К)

$$c'_p = \mu c_p / 22,4$$

10. Массовая изохорная теплоемкость, кДж/(кг·К)

$$c_v = c_p - R = c_p - 0,287$$

11. Мольная изохорная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)

$$\mu c_v = c_v \cdot \mu = c_v \cdot 29$$

12. Объемная изохорная теплоемкость, кДж/(нм³·К)

$$c'_v = \mu c_v / 22,4$$

Контрольные вопросы и задания

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для определения теплоемкости?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания термоЭДС от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Дайте определение теплоемкости.
2. Что называется удельной теплоемкостью вещества?
3. Перечислите удельные теплоемкости, укажите единицы их измерения и связь между ними.
4. Почему объемная теплоемкость отнесена к нм³, а не просто к м³?
5. Что такое истинная и средняя теплоемкости?
6. От чего зависит теплоемкость идеального и реального газа?
7. Какая из двух теплоемкостей c_p или c_v больше и почему? (объясните это использовать выражение 1-го закона термодинамики)?
8. Чему равна теплоемкость изотермического процесса?
9. Чему равна теплоемкость адиабатного процесса?
10. Может ли теплоемкость быть отрицательной?

11. Как, пользуясь понятием теплоемкости, вычислить количество тепла? Для всех ли процессов можно это сделать?
12. В каком случае истинная и средняя теплоемкости численно равны?
13. Получилось бы измеренное значение c_p завышенным или заниженным, если бы показания приборов были сняты до установления стационарного режима?
14. Что такое стационарный режим? Его признак.
15. Каким образом в лабораторной работе определяется расход воздуха?
16. Как бы выглядела (схематически) установка для определения изохорной теплоемкости газа?
17. В какую сторону (в сторону увеличения или уменьшения) изменилось бы измеренное на данной установке значение c_p при отсутствии тепловой изоляции экспериментального участка?
18. Физический смысл универсальной газовой постоянной. Уравнение Майера.
19. Зависимость теплоемкости от температуры.
20. Способы определения теплоемкости в зависимости от температуры.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

Цель работы – ознакомиться с основными физическими свойствами жидкостей, принципами их измерения и определения. Изучить устройство и принцип действия приборов для определения этих свойств и приобрести практические навыки работы с этими приборами.

Задание

1. Экспериментальным путем определить коэффициент теплового расширения исследуемых жидкостей.
2. При помощи ареометров измерить плотность трех жидкостей.
3. Для выбранных жидкостей определить вязкость при помощи вискозиметра Стокса.
4. Для выбранных жидкостей измерить вязкость капиллярным вискозиметром.
5. Для выбранных жидкостей измерить поверхностное натяжение сталагмометром.

Устройство для изучения физических свойств жидкости содержит пять приборов, выполненных в общем корпусе (рис. 4), на котором указаны параметры для обработки опытных данных. Приборы **3 – 5** начинают действовать при перевертывании. Термометр **1** показывает температуру окружающей среды и, следовательно, температуру жидкостей во всех устройствах.

Описания экспериментальной установки

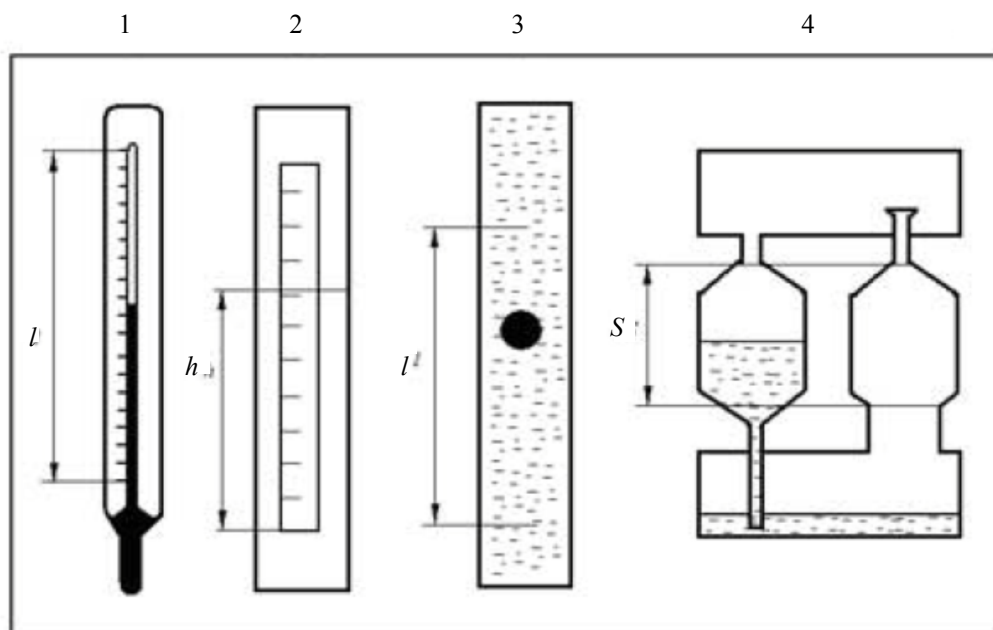


Рис. 4. Экспериментальная установка
для изучения физических свойств жидкости:

1 – термометр; 2 – ареометр; 3 – вискозиметр Стокса;
4 – капиллярный вискозиметр; 5 – сталагмометр

Порядок выполнения работы

1. Определение коэффициента теплового расширения жидкости

Термометр 1 имеет стеклянный баллон с капилляром, заполненные термометрической жидкостью, и шкалу. Принцип его действия основан на тепловом расширении жидкостей. Варьирование температуры окружающей среды приводит к соответствующему изменению объема термометрической жидкости и ее уровня в капилляре. Уровень указывает на шкале значение температуры.

Коэффициент теплового расширения термометрической жидкости определяется в следующем порядке на основе мысленного эксперимента, т.е. предполагается, что температура окружающей среды повысилась от нижнего (нулевого) до верхнего предельного значения термометра и уровень жидкости в капилляре возрос на величину l .

Обработка экспериментальных данных

1. Подсчитать общее число градусных делений ΔT в шкале термометра и измерить расстояние l между крайними штрихами шкалы.
2. Вычислить приращение объема термометрической жидкости

$$\Delta W = \pi r^2 l$$

где r – радиус капилляра термометра.

3. С учетом начального (при 0 °С) объема термометрической жидкости W найти значение коэффициента теплового расширения

$$\beta_T = (\Delta W/W) \Delta T$$

и сравнить его со справочным значением β_m^* (*приложение*). Значения используемых величин занести в таблицу 4.1.

$$\Delta = \frac{\beta_m^* - \beta_m}{\beta_m^*} \cdot 100$$

Таблица 4.1

Таблица наблюдений и вычислений

Величина		Размерность	Значения в опытах		
Наименование	Обозначение		1	2	3
Радиус капилляра термометра	r	см			
Приращение объема термометрической жидкости	ΔW	см ³			
Общее число градусных делений	ΔT	°С			
Расстояние между крайними штрихами шкалы	l	см			
Начальный (при 0 °С) объем термометрической жидкости	W	см ³			
Коэффициент теплового расширения	β_T	°С ⁻¹			
Справочный коэффициент теплового расширения	β_m^*	°С ⁻¹			

2. Измерение плотности жидкости ареометром

Ареометр 2 служит для определения плотности жидкости поплавковым методом. Он 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.

Обработка экспериментальных данных

1. Измерить глубину погружения h ареометра по миллиметровой шкале.
2. Вычислить плотность жидкости по формуле

$$\rho = 4 m / (\pi d^2 h),$$

где m – масса ареометра; d – диаметр ареометра.

Эта формула получена путем приравнивания силы тяжести ареометра

$$G = m g$$

и выталкивающей (архимедовой) силы

$$P_A = \rho g W,$$

где W – объем погруженной части ареометра:

$$W = (\pi d^2 / 4) h .$$

3. Сравнить опытное значение плотности ρ со справочным значением ρ^* (**приложение**). Значения используемых величин свести в табл. 4.2.

$$\Delta = \frac{\rho^* - \rho}{\rho^*} \cdot 100$$

Таблица 4.2

Таблица наблюдений и вычислений

Величина		Размерность	Значения в опытах		
Наименование	Обозначение		1	2	3
Масса ареометра	m	$г$			
Диаметр ареометра	d	$см$			
Глубина погружения	h	$см$			
Объем погруженной части ареометра	W				
Опытное значение плотности	ρ	$г/см^3$			
Справочное значение плотности	ρ^*	$г/см^3$			

3. Определение вязкости вискозиметром Стокса

Вискозиметр Стокса **3** достаточно прост, содержит цилиндрическую емкость, заполненную исследуемой жидкостью, и шарик. Прибор позволяет определить вязкость жидкости по времени падения шарика в ней следующим образом.

Обработка экспериментальных данных

1. Повернуть устройство 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 сопри-

косновения со стенками. Опыт выполнить три раза, а затем определить среднее арифметическое значение времени t .

2. Вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости жидкости

$$\nu = g d^2 t (\rho_{\text{ш}} / \rho - 1) / [18l + 43,2l (d / D)]$$

где g – ускорение свободного падения; d , D – диаметры шарика и цилиндрической емкости; ρ – плотность жидкости; $\rho_{\text{ш}}$ – плотность материала шарика.

3. Сравнить опытное значение коэффициента вязкости ν с табличным значением ν^* (**приложение**). Значения используемых величин свести в таблицу 4.3.

$$\Delta = \frac{\nu^* - \nu}{\nu^*} \cdot 100$$

Таблица 4.3

Таблица наблюдений и вычислений

Величина		Размерность	Значения в опытах		
Наименование	Обозначение		1	2	3
Плотность исследуемой жидкости	ρ	кг/м^3			
Время прохождения шариком расстояния l	t	сек			
Пройденное шариком расстояние	l	м			
Диаметр шарика	d	м			
Диаметр цилиндрической емкости	D	м			
Плотность материала шарика	$\rho_{\text{ш}}$	г/м^3			
Коэффициента вязкости	ν	$\text{м}^2/\text{с}$			
Справочный коэффициент вязкости	ν^*	$\text{м}^2/\text{с}$			

4. Измерение вязкости капиллярным вискозиметром

Капиллярный вискозиметр **4** включает емкость с капилляром. Вязкость определяется по времени истечения жидкости из емкости через капилляр.

Обработка экспериментальных данных

1. Перевернуть устройство в вертикальной плоскости и определить секундомером время t истечения через капилляр объема жидкости между метками (высотой S) из емкости вискозиметра **4** и температуру T по термометру **1**.

2. Вычислить значение кинематического коэффициента вязкости

$$\nu = M t ,$$

где M – постоянная прибора.

3. Сравнить полученное значение с табличным ν^* (*приложение*). Данные свести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Таблица наблюдений и вычислений

Величина		Размерность	Значения в опытах		
Наименование	Обозначение		1	2	3
Постоянная прибора	M	$\text{м}^2/\text{с}^2$			
Время истечения жидкости	t	с			
Кинематический коэффициент вязкости	ν	$\text{м}^2/\text{с}$			
Справочный коэффициент кинематической вязкости	ν^*	$\text{м}^2/\text{с}$			
Температура в лаборатории по термометру 1.	T	$^{\circ}\text{C}$			

5. Измерение поверхностного натяжения сталагмометром

Сталагмометр **5** служит для определения поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель и содержит емкость с капилляром, расширенным на конце для накопления жидкости в виде капли. Сила поверхностного натяжения в момент отрыва капли равна ее весу (силе тяжести), и поэтому определяется по плотности жидкости и числу капель, полученному при опорожнении емкости с заданным объемом.

Обработка экспериментальных данных

1. Перевернуть устройство и подсчитать число капель, полученных в сталагмометре **5** из объема высотой S между двумя метками. Опыт повторить три раза и вычислить среднее арифметическое значение числа капель n .

2. Найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения:

$$\sigma = K \rho / n,$$

где K – постоянная сталагмометра.

3. Сравнить полученное значение коэффициента поверхностного натяжения с табличным σ^* (*приложение*). Данные свести в табл. 4.5.

$$\Delta = \frac{\sigma^* - \sigma}{\sigma^*} \cdot 100 .$$

Таблица наблюдений и вычислений

Величина		Размерность	Значения в опытах		
Наименование	Обозначение		1	2	3
Постоянная сталагмометра	K	$\text{м}^3/\text{с}$			
Плотность исследуемой жидкости	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$			
Среднее арифметическое значение числа капель	n				
Коэффициент поверхностного натяжения	σ	$\text{м}^2/\text{с}$			
Справочный коэффициент поверхностного натяжения	σ^*	$\text{м}^2/\text{с}$			

Контрольные вопросы и задания

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности проводится подготовка экспериментальной установки?
5. Какой метод используется для определения вязкости?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания приборов от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Дайте определение расширения жидкости и назовите величину, характеризующую это свойство.
2. Что понимают под температурным расширением жидкости? Как оценивается способность жидкости к расширению?
4. Что понимают под коэффициентом температурного расширения, в каких единицах он измеряется, от чего и как зависит?
5. Как определить коэффициент температурного расширения?
6. Что понимают под плотностью жидкости? Каковы единицы ее измерения? От чего и как зависит плотность жидкости?
7. Изменяется ли плотность жидкости при изменении ее температуры?
8. Как определить плотность жидкости при заданной температуре?
9. Как называется прибор для определения плотности жидкости?
10. Что понимают под сжимаемостью жидкости? Как оценивается способность жидкости к сжатию?
11. Что называют вязкостью жидкости?

12. Где в гидравлики используются знания о вязкости жидкости?
13. Назовите величину, которой оценивается вязкость жидкости.
14. Физический смысл динамического коэффициента вязкости?
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. Как называется прибор для определения вязкости жидкости?
20. Каково устройство вискозиметра Стокса?
21. Каково устройство капиллярного вискозиметра?
22. Принцип определения вязкости жидкости вискозиметром Стокса?
23. Каков принцип определения вязкости капиллярным вискозиметром?
24. Дайте определение понятия поверхностное натяжение жидкости.
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. Принцип определения коэффициента поверхностного натяжения?
29. Назовите единицы измерения теплового расширения, вязкости, плотности и поверхностного натяжения жидкости.
30. Укажите свойства жидкости, измеряемые термометром, ареометром, вискозиметром, сталагмометром.
31. Что называется касательным напряжением и как его определить?
32. Что такое модуль объемной упругости жидкости, в каких единицах он измеряется и от чего и как зависит?

Лабораторная работа № 5

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ

Цель работы – изучить кинетику процесса свободного осаждения твердых частиц из различного материала. Изучить устройство и принцип действия приборов для определения кинетики процесса свободного осаждения и приобрести практические навыки работы с этими приборами.

Задание

1. С помощью штангенциркуля измерить точный диаметры испытуемых шарообразных частиц из различного материала: свинец, сталь, латунь, стекло, полистирол и т.д.
2. С помощью секундомера измерить время свободного осаждения твердых частиц в различных средах: вода, моторное масло, глицерин.

3. Изучить процесс свободного осаждения твердых частиц шарообразной формы под действием силы тяжести.

4. Построить график зависимости $Re = f(Ar)$ и сравнить его с теоретическими данными.

Описания экспериментальной установки

Устройство для изучения кинетики процесса осаждения состоит из трех цилиндров, выполненных на общем стенде (рисунок 5), на котором указаны параметры для обработки опытных данных. Термометр показывает температуру окружающей среды и, следовательно, температуру жидкостей во всех цилиндрах.

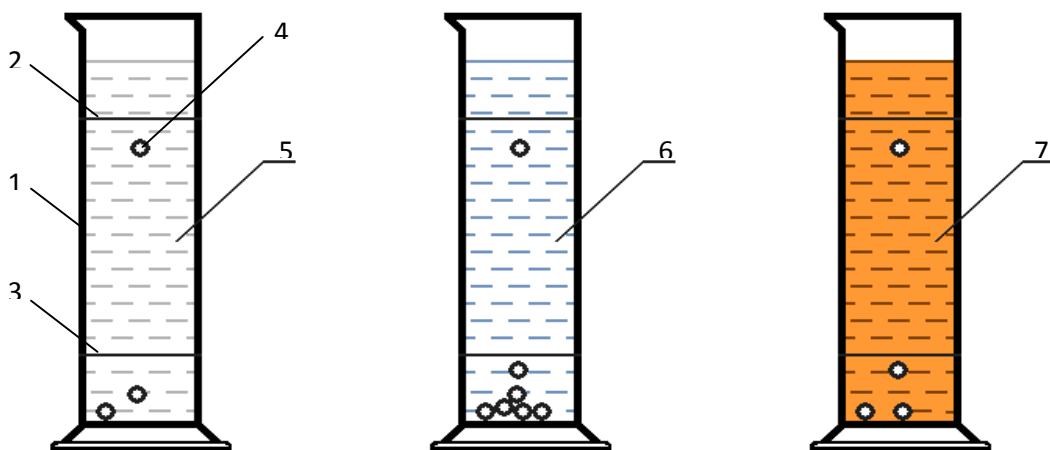


Рис. 5. Экспериментальная установка для измерения кинетики процесса осаждения:

1 – стеклянный прозрачный цилиндр; 2 – верхняя метка; 3 – нижняя метка; 4 – частица шарообразной формы; 5 – исследуемая жидкость I (вода); 6 – исследуемая жидкость II (глицерин); 7 – исследуемая жидкость III (машинное масло)

Порядок выполнения работы

Для проведения работы необходимо получить у преподавателя образцы частиц, штангенциркуль для измерения их диаметра и секундомер. Шарики известного или замеренного диаметра помещают над поверхностью жидкости в цилиндре и отпускают. При достижении им верхней метки включаем секундомер. Секундомером фиксируют время прохождения частицы между метками. Каждый опыт дублируем трижды, после чего проводим замеры с частицами другого материала. Результаты опытов заносят в табл.5.

Всего проводят не менее 9 – 12 опытов, в каждом по 3 – 4 замера. Если частица коснулась стенки сосуда или к частице прилип пузырек воздуха, результаты таких опытов (замеров) не учитывают и производят повторные опыты. После окончания опытов по измерения скорости осаждения частиц в глицерине переходят к цилиндрам с машинным маслом и водой.

При вычислении критериев Re и Ar используют осредненные значения скорости осаждения $\omega_{ос}$ и диаметра частицы.

Таблица наблюдений и вычислений

опыта	№ замера	Жидкость			Частицы (Шарики)			Время осаждения		значение критериев	
		название	$\rho_{ж}$ кг/м ³	$M_{ж}$	материал	d мм	c_T кг/м ³	ϕ	$\phi_{ср}$	Re	Ar
1	1										
	2										
	3										
2	1										
	2										
	3										
3	1										
	2										
	3										
...	1										
	2										
	3										
8	1										
	2										
	3										
9	1										
	2										
	3										

Обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных заключается в проведении расчётов, оценке относительной погрешности опытов. На основании полученных результатов формулируем необходимые выводы.

1. Определение действительной скорости осаждения частиц:

$$\omega_{ос} = L / \tau_{ср}.$$

2. По рассчитанной скорости осаждения находим значение критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_{ос} d_{ср} \rho_{ж}}{\mu}.$$

3. Рассчитываем значение критерия Архимеда:

$$Ar = \frac{d_{ср}^3 (\rho_{ч} - \rho_{ж}) g \rho_{ж}}{\mu^2}.$$

4. Рассчитываем значение критерия Лященко:

$$Ly = \frac{\omega_{ос}^3 \rho_{ж}}{\mu (\rho_{ч} - \rho_{ж})}.$$

5. Строим график зависимости $Re = f(Ar)$.

Контрольные вопросы и задания

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности выполняется лабораторная работа?
5. Какой метод используется для определения кинетики процесса осаждения?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли измеренные показания от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Задача ламинарного обтекания твердой шарообразной частицы вязкой Ньютонской жидкостью (задача Стокса).
2. Формула Стокса для определения силы сопротивления при ламинарном обтекании шарообразной частицы.
3. Что такое переходный и турбулентный режимы обтекания.
4. Закон сопротивления Ньютона. Коэффициент сопротивления.
5. Уравнение баланса сил при движении твердого тела в жидкости под действием внешних массовых сил.
6. Особенности задач обтекания единичных капель и пузырей.
7. Особенности коллективного обтекания частиц.
8. Классификация процессов осаждения.
9. Отстаивание (гравитационное осаждение). Физическая сущность и области промышленного применения процесса.
10. Дифференциальное уравнение движения твердой шарообразной частицы в жидкости под действием силы тяжести.
11. Уравнение подобия, описывающее процесс отстаивания.
12. Физический смысл числа Архимеда.
13. Порядок определения скорости осаждения по критерию Архимеда
14. Характеристика режимов обтекания твердых частиц произвольной формы.
15. Формула Стокса для определения скорости гравитационного осаждения частиц в ламинарном режиме, ее анализ.
16. Особенности осаждения единичных капель. Стесненное гравитационное осаждение.
17. Уравнение для расчета производительности отстойного аппарата.
18. Классификация отстойников. Конструкция отстойников. Схема расчета отстойников.
19. Осаждение под действием центробежных сил. Физическая сущность и области промышленного применения процесса.
20. Модифицированное число Архимеда.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы – определить вязкости различных жидкостей методом Н. Стокса. Изучить устройство и принцип действия приборов и приобрести практические навыки работы с этими приборами.

Задание

1. Экспериментальным путем определить время осаждения шариков.
2. Рассчитать скорость осаждения исследуемых образцов.
3. Рассчитать коэффициент внутреннего трения жидкости.
4. По данным вычислений рассчитать погрешность опыта.

Описания экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки для определения вязкости по методу Стокса показана на рисунке 6 и состоит из 3-х вертикальных стеклянных цилиндров 1, укрепленных вместе на раме. Высота каждого цилиндра 1 м, а диаметр 50 мм. Диаметр цилиндра значительно больше диаметра шарика. Сверху цилиндр закрывают пробкой 2 с отверстием для опускания шарика.

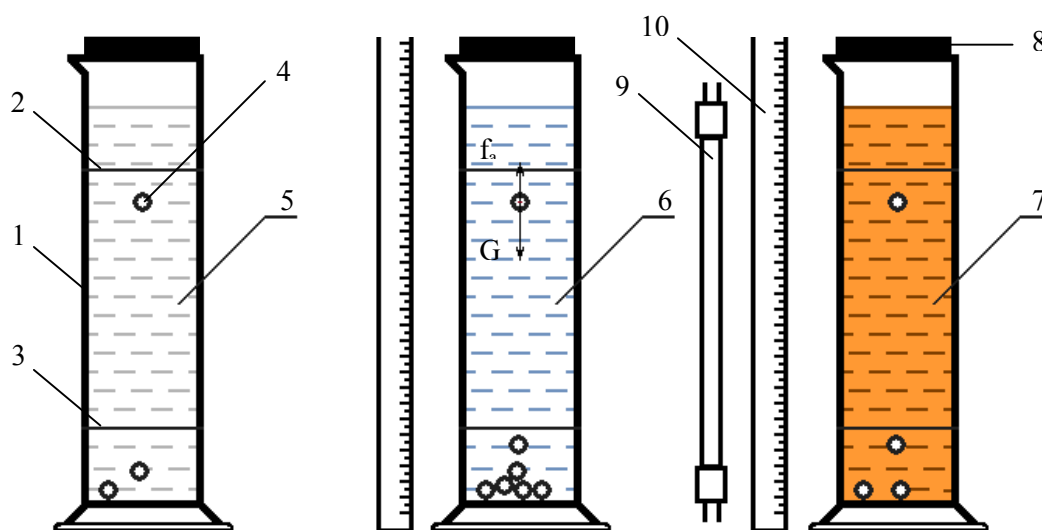


Рис.6. Экспериментальная установка для определения вязкости жидкости методом Стокса:

1 – стеклянный цилиндр; 2 – верхняя контрольная отметка; 3 – нижняя контрольная отметка; 4 – частица шарообразной формы; 5 – исследуемая жидкость I (вода); 6 – исследуемая жидкость II (глицерин); 7 – исследуемая жидкость III (машинное масло); 8 – пробка цилиндра; 9 – линейка для измерения пути; 10 – электрическая подсвет

Для удобства наблюдения за движением шарика в цилиндре включают электрический подсвет **4**. Время движения шарика отсчитывают по секундомеру. В верхней части цилиндра сделана отметка **5**, ниже которой можно считать движение шарика равномерным. Цилиндр заполняют исследуемой жидкостью.

Порядок выполнения работы

Записать температуру исследуемой жидкости. Штангенциркулем измерить диаметр и найти радиус r шарика. Диаметр каждого шарика измерить три раза по разным направлениям. За «истинное» принять среднее значение диаметра. Плотность шариков ρ указана в таблицах на установке.

Опустить шарик известного радиуса r в жидкость и по счетчику времени замерить время τ падения шарика между верхней и нижней меткой на цилиндре или между двумя делениями на метрической линейке **3** (смотри рис. 6).

Измерить расстояние h между первой и второй меткой, а затем вычислить среднюю скорость u_0 для каждого измеренного промежутка времени по формуле. Рассчитать величину η . Опыт повторить не менее 3 – 4 раз, используя каждый раз новые шарiki.

Оценить ошибку результата по отклонениям от среднего. Результаты наблюдений и вычислений записать в табл. 6.

Таблица 6

Таблица наблюдений и вычислений

Величина		Размерность	Жидкость № 1			Жидкость № 2			Жидкость № 3		
Наименование	Обозначение		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Радиус шарика	r	$мм$									
Время падения шарика	τ	$сек$									
Расстояние между первой и второй риской	h	$м$									
Средняя скорость падения	u_0	$м/с$									
Коэффициент внутреннего трения жидкости	η	$Па\ c$									
Плотность шарика	$\rho_{ш}$	$кг/м^3$									
Плотность жидкости	$\rho_{ж}$	$кг/м^3$									

Обработка экспериментальных данных

1. По измеренному расстоянию h между первой и второй меткой, а затем вычислить среднюю скорость u_0 для каждого измеренного промежутка времени по формуле:

$$u_0 = \frac{h}{\tau}.$$

2. Пользуясь формулой, рассчитать величину η .

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_0)}{9} \frac{gr^2}{u_0}$$

3. На шарик, движущийся в вязкой жидкости, действуют три силы:
– сила тяжести

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g;$$

- выталкивающая сила Архимеда

$$f_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g;$$

- сила вязкого трения, которую по Стоксу выражают формулой

$$f_c = 6\pi r \eta u;$$

где r – радиус шарика; ρ – плотность материала шарика; ρ_0 – плотность жидкости; η – коэффициент внутреннего трения (вязкости); u – скорость падающего шарика.

4. Оценить ошибку результата по отклонениям от среднего.

$$\Delta = \frac{\eta^* - \eta}{\eta^*} \cdot 100$$

5. Результаты вычислений записать в табл. 6.

Контрольные вопросы и задания

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности выполняется лабораторная работа?
5. Какой метод используется для определения вязкости?
6. Когда производится запись показаний?
7. Зависят ли измеренные показания от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Задача ламинарного обтекания твердой шарообразной частицы вязкой Ньютонической жидкостью (задача Стокса).
2. Формула Стокса для определения силы сопротивления при ламинарном обтекании шарообразной частицы.
3. Что такое переходный и турбулентный режимы обтекания.
4. Закон сопротивления Ньютона. Коэффициент сопротивления.
5. Уравнение баланса сил при движении твердого тела в жидкости под действием внешних массовых сил.

6. Особенности задач обтекания единичных капель и пузырей.
7. Особенности коллективного обтекания частиц.
8. Классификация процессов осаждения.
9. Отстаивание (гравитационное осаждение). Физическая сущность и области промышленного применения процесса.
10. Дифференциальное уравнение движения твердой шарообразной частицы в жидкости под действием силы тяжести.
11. Уравнение подобия, описывающее процесс отстаивания.
12. Физический смысл числа Архимеда.
13. Порядок определения скорости осаждения по критерию Архимеда
14. Характеристика режимов обтекания твердых частиц произвольной формы.
15. Формула Стокса для определения скорости гравитационного осаждения частиц в ламинарном режиме, ее анализ.
16. Особенности осаждения единичных капель. Стесненное гравитационное осаждение.
17. Уравнение для расчета производительности отстойного аппарата.
18. Классификация отстойников. Конструкция отстойников. Схема расчета отстойников.
19. Осаждение под действием центробежных сил. Физическая сущность и области промышленного применения процесса.
20. Модифицированное число Архимеда.

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ И НАСАДКИ

Цель работы – определить значение коэффициента истечения жидкости через отверстия в насадке различной формы. Изучить устройство приборов и принцип определения коэффициента истечения, а так же приобрести практические навыки работы с этими приборами.

Задание

1. Определить действительный расход воды через малое отверстие в тонкой стенке.
2. Определить расход воды, проходящей через насадку.
3. Найти коэффициент расхода μ для разных насадок.
4. Найти значения коэффициентов μ , полученных из опыта, сравнить их с табличными.
5. Определить время опорожнения сосуда и сравнить его с теоретическим значением.

Описания экспериментальной установки

Установка для изучения истечения жидкости из малого отверстия показана на рис. 7 состоит из напорного бака 1, в нижней части которого сделано гнездо, закрываемое при помощи клапана 2. В гнездо могут быть вставлены и закреплены специальными гайками пластины, имеющие отверстия различной формы.

Расход воды регулируется краном 3. Слив 4 служит для создания постоянства напора ΔH . Положение уровня жидкости в баке определяется по водомерному стеклу 5, нуль шкалы которого совмещен с центром отверстия. Для измерения координат точек вытекающей струи служит горизонтально расположенная линейка с делениями и ползунком. Ползунок имеет градуированный на миллиметры вертикально перемещающийся стержень, оканчивающийся иглой. Диаметр струи измеряется штангенциркулем. Расход жидкости измеряется объемным способом.

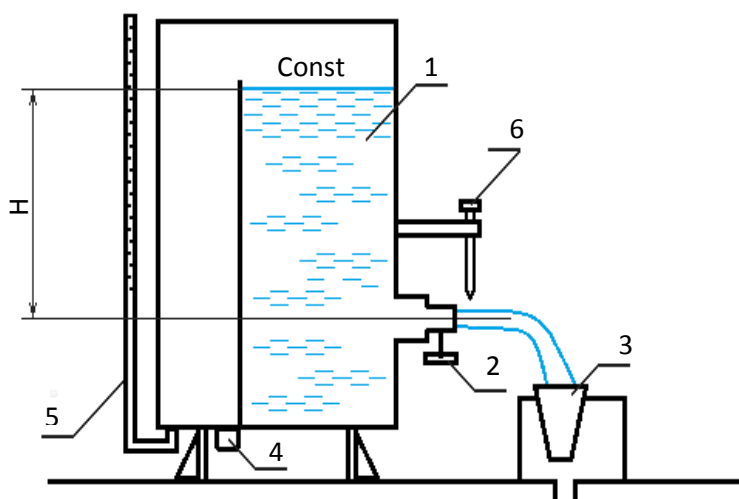


Рис. 7. Экспериментальная установка для определения коэффициента истечения через отверстие и насадки:

1 – сосуд; 2 – регулирующий кран; 3 – мерная емкость; 4 – слив;
5 – водомерная стеклянная мерка; 6 – мерное устройство.

Порядок выполнения работы

В гнездо сосуда 2 (рис. 7) установить насадку с круглым отверстием. Напорный бак при закрытом клапане заполнить водой до слива. Подачу жидкости в бак регулировать так, чтобы во время опыта для поддержания постоянства напора непрерывно работал слив. Измерить напор воды в баке ΔH по водомерному стеклу.

Струю жидкости после открытия клапана 2 направить в мерный бак, измерить объем воды и время наполнения по секундомеру. Опыт повторить 3 – 4 раза. Измерить координаты струй x и y в двух произвольно взятых сечениях. Измерить диаметр струи в сжатом сечении.

В гнездо бака поочередно вставить различные насадки, квадратного и треугольного сечений и продемонстрировать явление инверсии струи для этих сечений.

Измеряют диаметр отверстия насадка, вставляют его в гнездо напорного бака. При закрытом клапане бак заполняют водой, затем клапан открывают. Подача жидкости в напорный бак регулируется краном **3** так, чтобы во время опыта бесперебойно работал слив. По уровнемерному стеклу измеряют уровень жидкости в напорном баке. Струю жидкости после открытия клапана **2** направляют в мерный бак. Определяют объем воды в баке и время наполнения по секундомеру. Опыт повторить 3 – 4 раза для каждого насадка.

Все экспериментальные результаты заносятся в соответствующие графы отчета по прилагаемой форме (табл. 7).

Таблица 7

Таблица наблюдений и вычислений

Тип, насадка, эскиз	№ замера	Объем мерного бака W , л	Время наполнения t , с	Расхождение между опытами и табличными данными $\frac{\mu_{оп} - \mu_{т}}{\mu_{т}} 100, \%$	Расход		Коэффициент расхода	
					из опыта $Q_{оп}$, л/с	теоретический $Q_{теор}$, л/с	из опыта $\mu_{оп}$, б/р	табличный $\mu_{ф}$, б/р
1	1							
	2							
	3							
...	1							
	2							
	3							
5	1							
	2							
	3							

Обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных заключается в проведении расчётов, оценке относительной погрешности опытов. На основании полученных результатов формулируем необходимые выводы.

1. Расход воды, проходящей через насадки, определяют по формуле:

$$Q_d = \frac{W}{t}$$

2. Коэффициент расхода μ для разных насадок определяют по формуле

$$\mu = \frac{Q_d}{f \sqrt{2gH}}$$

где Q_d – действительный расход через насадок.

3. Значения коэффициентов μ , полученных из опыта, сравнивают с табличными (табл. 4).

4. Все результаты вычислений заносятся в соответствующие графы отчета по прилагаемой форме (табл. 7).

Контрольные вопросы и задания

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности выполняется лабораторная работа?
5. Какой метод используется при выполнении работы?
6. Когда производится запись показаний измерений?
7. Зависят ли измеренные показания от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Назовите насадки, имеющий наибольшее значение ϕ .
2. Объясните процесс течения жидкости в насадках.
3. Дайте определение понятия коэффициент сжатия струи.
4. Назовите определение коэффициента расхода отверстия.
5. Объясните смысл понятия инверсия струи.
6. Уравнение Бернулли для идеальной и реальной жидкости.
7. Коэффициент скорости истечения, его физический смысл.
8. Сжатие струи, коэффициент сжатия.
9. Коэффициент расхода при истечении жидкости и его экспериментальное определение.
10. Зависимость коэффициентов сжатия струи, скорости и расхода от критерия Рейнольдса для круглого отверстия в тонкой стенке.
11. Типы насадок и особенности истечения жидкости.
12. Формула Торичелли.
13. Истечение под уровень.
14. Определение времени опорожнения сосуда.
15. Расход жидкости при истечении через водослив.
16. Критерий Вебера и его физический смысл.
17. Уравнение для расчета производительности аппарата.
18. Влияние сил поверхностного натяжения на форму струн.
19. Методы измерения расхода и скорости жидкости при истечении.
20. Модифицированное число Архимеда.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Коэффициенты пересчета K от одних единиц давления к другим

А	В						
	Н/м ²	бар	ат = кгс/см ²	физ.ат. атм	мм рт.ст.	мм вод.ст.	кг/м ²
Н/м ² (Па)	1	10 ⁻⁵	1,019· 10 ⁻⁵	0,9869· 10 ⁻⁵	750,06· 10 ⁻⁵	0,10197	0,102
бар	10 ⁵	1	1,01972	0,98692	750,06	1,01972 · 10 ⁻⁴	1,02·10 ⁴
ат = кгс/см ²	0,981· 10 ⁵	0,98067	1	0,96784	735,56	10 ⁻⁴	10 ⁴
физ.ат. атм	1,013· 10 ⁵	1,01325	1,0332	1	760	1,0332 · 10 ⁻⁴	1,033· 10 ⁴
мм рт.ст.	133,322	1,3332· 10 ⁻³	1,3758· 10 ⁻³	1,3158· 10 ⁻³	1	13,5951	13,6
мм вод.ст.	9,80665	9,80665	10 ⁻⁴	9,679· 10 ⁻⁵	7,3556· 10 ⁻⁴	1	10 ³
кг/м ²	9,81	0,981· 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0,968· 10 ⁻⁴	0,736· 10 ⁻¹	10 ⁻³	1

Таблица П 2

Зависимость между давлением p_s и температурой t_s для
насыщенного водяного пара

p_s , ата	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C	p_s , мм рт.ст.	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C
0,035	26,4	0,12	49,1	0,27	66,3	725	98,8	1,0	99,1	2,5	126,8
0,040	28,6	0,13	50,7	0,28	67,1	730	98,9	1,1	101,8	2,6	128,1
0,045	30,7	0,14	52,2	0,29	67,9	735	99,1	1,2	104,2	2,7	129,3
0,050	32,6	0,15	53,6	0,30	68,7	740	99,2	1,3	106,6	2,8	130,5
0,055	34,2	0,16	54,9	0,32	70,2	745	99,4	1,4	108,7	2,9	131,7
0,060	35,8	0,17	56,2	0,34	71,6	750	99,6	1,5	110,8	3,0	132,9
0,065	37,3	0,18	57,4	0,36	72,9	755	99,8	1,6	112,7	3,1	134,0
0,070	38,7	0,19	58,6	0,38	74,2	760	100,0	1,7	114,6	3,2	135,1
0,075	40,0	0,20	59,7	0,40	75,4	765	100,2	1,8	116,3	3,3	136,1
0,080	41,2	0,21	60,7	0,45	78,3	770	100,4	1,9	118,0	3,4	137,2
0,085	42,3	0,22	61,7	0,50	80,9	775	100,5	2,0	119,6	3,5	138,2
0,090	43,4	0,23	62,7	0,55	83,2	780	100,7	2,1	121,2	3,6	139,2
0,095	44,5	0,24	63,6	0,60	85,5	785	100,9	2,2	122,6	3,7	140,2
0,10	45,5	0,25	64,6	0,65	87,5	790	101,1	2,3	124,1	3,8	141,1
0,11	47,3	0,26	65,4	0,70	89,4	800	101,4	2,4	125,5	3,9	142,0

Таблица ПЗ

Физические свойства жидкостей

Жидкость	ρ , кг/м ³	$\beta_P \cdot 10^3$, МПа ⁻¹	$\beta_T \cdot 10^3$, °C ⁻¹	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м
Вода пресная	998	0,49	0,15	1,01	73
Спирт этиловый	790	0,78	1,10	1,52	23
Масло Автол М-8В	900	0,60	0,64	300	25
Масло Индустриальное 20	900	0,72	0,73	110	25
Масло Трансформаторное	890	0,60	0,70	30	25
Масло АМГ-10	850	0,76	0,83	20	25

Таблица П4

Характеристики насадок используемых в лабораторных установках

Жидкость	Коэффициент			
	ξ	ε	φ	μ
(Круглое отверстие)	0,06	0,64	0,97	0,62
Внешний цилиндрический	0,5	1,00	0,82	0,82
Внутренний цилиндрический	1,00	1,00	0,71	0,71
Конический расходящийся при $\alpha = 5 - 7^\circ$	0,4	1,0	0,50	0,50
Конический расходящийся при $\alpha = 13^\circ 24'$	0,09	0,98	0,96	0,94
Конусоидальный	0,04	1,0	0,98	0,98

Таблица П5

Физические свойства воздуха при 760 мм рт.ст.

t , °C	ρ , кг/м ³	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,293	2,44	13,28	0,707
10	1,247	2,51	14,16	0,705
20	1,205	2,59	15,06	0,703
30	1,165	2,67	16,00	0,701
40	1,128	2,76	16,96	0,699
50	1,093	2,86	17,95	0,698
60	1,060	2,90	18,97	0,696
70	1,029	2,97	20,02	0,694
80	1,000	3,05	21,09	0,692
90	0,972	3,13	22,10	0,690
100	0,946	3,21	23,13	0,688

Таблица П6

Зависимость между давлением и температурой
насыщенного водяного пара

p , ата t , °C	1,0 99,1	1,1 101,8	1,2 104,2	1,3 106,6	1,4 108,7	1,5 110,8	1,6 112,7
p , мм рт.ст. t , °C	750 99,6	760 100	770 100,4	780 100,7	790 101,1	800 101,4	810 101,8

Таблица П7

Физические свойства воды на линии насыщения

t , °C	ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг·K)	λ , Вт/(м·K)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	
0	999,8	4,217	0,552	1,792	13,67
10	999,7	4,191	0,578	1,307	9,47
20	998,2	4,181	0,598	1,004	7,01
30	995,7	4,178	0,614	0,801	5,43
40	992,2	4,178	0,628	0,658	4,35
50	988,0	4,180	0,641	0,554	3,57
60	983,2	4,180	0,651	0,475	3,00
70	977,8	4,189	0,661	0,413	2,56
80	970,8	4,196	0,369	0,365	2,23
90	965,3	4,204	0,676	0,326	1,96
100	958,4	4,215	0,682	0,295	1,75

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – 10-е изд., стер., дораб. перепеч. с изд. 1973 г / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс». 2008 г. 753 с.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 400 с.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 368 с.
4. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Ю.И. Дытнерский [и др.]. – 4-е изд. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2008. – 496 с.
5. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2013. – 576 с.
6. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
7. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Книга 1 / В.Г. Айнштейн [и др.]. – М.: Логос, 2002. – 912 с.
8. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Книга 2 / В.Г. Айнштейн [и др.]. – М.: Логос, 2002. – 872 с.
9. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т. 1. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. – 850 с.
10. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т. 2. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. – 1025 с.
11. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т. 3. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. – 968 с.
12. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Системы газ-жидкость, пар-жидкость, жидкость-жидкость / В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.