

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА

**Практикум
по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине для студентов
специальностей 1-43 01 05 «Промышленная
теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая
эксплуатация энергооборудования организаций»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2020

УДК 532(075.8)
ББК 30.123я73
Г46

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 26.02.2019 г.)*

Составители: *А. В. Шаповалов, В. В. Киселевич*

Рецензент: доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Т. В. Алферова*

Гидрогазодинамика : практикум по выполнению лаборатор. работ по одному.
Г46 дисциплине для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч.
форм обучения / сост.: А. В. Шаповалов, В. В. Киселевич. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Су-
хого, 2020. – 56 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ;
свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим
доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-437-7.

Содержит материал для закрепления теоретических знаний по основным разделам дисцип-
лины, а также для выполнения экспериментальных измерений, обработки и анализа полученных
данных и приобретения навыков технических измерений.

Для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07
«Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

УДК 532(075.8)
ББК 30.123я73

ISBN 978-985-535-437-7

- © Шаповалов А. В., Киселевич В. В.,
составление, 2020
- © Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2020

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий практикум предусматривает выполнение цикла лабораторных работ по дисциплине «Гидрогазодинамика». Основной целью практикума является углубление и расширение знаний студентов по означенной дисциплине, а также привитие студентам практических навыков выполнения экспериментальных измерений и их последующей обработки. Практикум содержит восемь лабораторных работ, выполняемых на двух экспериментальных стендах, и вспомогательные материалы справочного характера, размещенные в приложениях.

Для допуска к выполнению лабораторной работы на стенде студент должен изучить требования техники безопасности, устройство стенда и провести самостоятельную подготовку к занятию. Во время проведения измерений студент обязан неукоснительно следовать правилам общей, электрической и противопожарной безопасности, с которыми его должен ознакомить преподаватель. Студент, не прошедший инструктаж по технике безопасности, не допускается к работе на лабораторной установке.

Подготовка к занятию предусматривает изучение основных теоретических положений по теме выполняемой работы и оформление разделов отчета, не требующих наличия экспериментальных данных. В заготовках отчетов необходимо привести формы таблиц измеряемых и рассчитываемых характеристик. Схему экспериментальной установки следует вычерчивать один раз и приводить ее в отчете по первой из выполняемых на стенде работ. Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом в отдельной тетради в соответствии с действующей нормативно-технической документацией.

Содержание отчета:

- наименование и цель лабораторной работы;
- ключевые теоретические положения;
- схема экспериментальной установки;
- таблицы измеряемых и рассчитываемых параметров;
- пример обработки результатов эксперимента (с подстановкой числовых значений величин, полученных в ходе выполнения одного опыта);
- графические зависимости;
- выводы.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ЖИДКОСТИ

Цель работы: ознакомиться с физической сущностью, единицами и средствами измерения давления и расхода жидкости; выполнить экспериментальное определение указанных гидравлических характеристик; рассчитать удельные потери давления по длине трубопровода.

Краткие теоретические сведения

Основными гидравлическими характеристиками являются давление p , Па, и объемный расход G_V , м³/с, произведение которых представляет собой гидравлическую мощность

$$N = pG_V, \text{ Вт.} \quad (1.1)$$

Давление – это напряжение, возникающее в жидкости или газе в результате действия сжимающих сил и сил трения. Если система находится в состоянии покоя, то силы трения равны нулю. В этом случае давление иногда называют **гидростатическим**. Гидростатическое давление представляет собой не что иное, как напряжение сжатия. Различают давление среднее и давление в точке. Чаще всего используют среднее давление, которое находят из соотношения

$$p = F/S, \text{ Па,} \quad (1.2)$$

где F – сила сжатия, Н, приходящаяся на поверхность площадью S , м².

Различают абсолютное (полное) $p_{\text{абс}}$, избыточное (манометрическое) $p_{\text{изб}}$ и вакуумметрическое $p_{\text{вак}}$ давления. **Абсолютное давление** отсчитывается от абсолютного нуля, за который принято давление в пустоте. Абсолютное давление может быть только положительным. **Избыточное давление** отсчитывается от нуля, за который принято атмосферное (барометрическое) $p_{\text{атм}}$ давление. Величина атмосферного давления зависит от ряда факторов: высоты над уровнем моря, погодных условий и др. При решении большинства инженерных задач атмосферное давление можно считать постоянной величиной, равной 0,101 МПа.

Связь избыточного и абсолютного давления устанавливается следующим выражением:

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}, \text{ Па.} \quad (1.3)$$

При $p_{\text{абс}} < p_{\text{атм}}$ избыточное давление является отрицательным. Давление в этом случае называют **вакуумметрическим** (отрицательным избытком над вакуумом). Вакуумметрическое давление отсчитывают от атмосферного в сторону абсолютного нуля и определяют по выражению

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}}, \text{ Па.} \quad (1.4)$$

Предположим, что давление в системе соответствует точке 1 (рис. 1.1). Этой точке соответствуют абсолютное $p_{\text{абс.1}}$ и избыточное $p_{\text{изб.1}}$ давления. Как видно из рис. 1.1, давление $p_{\text{абс.1}}$ больше $p_{\text{изб.1}}$ на величину атмосферного давления, т. е. на 0,101 МПа. В точке 2 абсолютное давление $p_{\text{абс.2}}$ меньше атмосферного. Этой точке соответствуют абсолютное $p_{\text{абс.2}}$ и вакуумметрическое $p_{\text{вак.2}}$ давления. Вакуумметрическое давление может изменяться в пределах от 0 до 0,101 МПа. Абсолютному нулю соответствует давление $p_{\text{вак}} = 0,101$ МПа.



Рис. 1.1. Виды давлений

За единицу давления в международной системе единиц (СИ) принят паскаль – давление, создаваемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м². В технике для измерения давления используют также внесистемные единицы – атмосферу техническую (1 атм = 1 кгс/см² = 98,1 кПа) и бар (1 бар = 10⁵ Па).

Для измерения давления жидкостей и газов используют **пьезометры**, а также жидкостные, механические и электрические **манометры**. В технике для измерения давления наибольшее применение находят механические и электрические манометры. Различают механические манометры двух типов: пружинные и мембранные. Принцип

их действия основан на деформации полой пружины или мембраны под действием измеряемого давления. Через преобразующий механизм эта деформация передается стрелке, которая показывает величину измеряемого давления на циферблате. В электрическом манометре деформация мембраны передается на потенциометр, что приводит к изменению его электрического сопротивления. Потенциометр включен в электрическую измерительную схему. С помощью **манометров** измеряют **избыточное давление**. Для измерения вакуумметрического давления используют **вакуумметры**. Существуют также комбинированные приборы – **мановакуумметры**, которые позволяют измерять как избыточное, так и вакуумметрическое давление. Важнейшей характеристикой манометра является класс точности. Манометры бывают следующих классов точности: 0,1; 0,15; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 2,5; 4. Для измерения давления с повышенной точностью используют **образцовые манометры**, имеющие класс точности 0,1; 0,15; 0,25 и 0,4.

Расход – это количество жидкости (газа), проходящей через живое сечение потока в единицу времени. Различают объемный G_V (м³/с), весовой G_γ (Н/с) и массовый G_m (кг/с) расходы.

Весовой и массовый расходы связаны с объемным расходом следующими выражениями:

$$G_\gamma = \gamma G_V, \text{ Н/с}; \quad (1.5)$$

$$G_m = \rho G_V, \text{ кг/с}, \quad (1.6)$$

где γ – удельный вес жидкости, Н/м³; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Наиболее простым способом измерения расхода является объемный способ, состоящий в том, что измеряется время τ прохождения через систему определенного объема жидкости V_w , которая поступает в мерный бак. Зная V_w и τ , вычисляют объемный расход по формуле

$$G_V = V_w / \tau, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1.7)$$

На практике наиболее широкое применение для измерения расхода получили расходомеры двух типов: **объемные** и **скоростные**.

Принцип действия **объемных расходомеров** основан на попеременном заполнении и опустошении рабочей камеры. Число заполнений (либо опустошений), подсчитываемое с помощью специальных устройств (механических, электрических), характеризует расход через систему. Достоинством объемных расходомеров является высокая точность измерения: максимальная относительная погрешность не

превышает 1 %. Недостаток – громоздкость и сложность конструкции, а для некоторых расходомеров – невозможность применения для загрязненных жидкостей. Объемные расходомеры бывают различных типов: дисковые, поршневые, шестеренные, кольцевые и лопастные.

Принцип действия **скоростных расходомеров** основан на том, что жидкость, протекающая через прибор, приводит во вращение крыльчатку, частота вращения которой пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу. Ось крыльчатки посредством передаточных механизмов соединена со счетчиком. Скоростные расходомеры по конструкции проще объемных, но обладают меньшей точностью измерений. Максимальная относительная погрешность измерений может достигать 2–3 %. По конструктивному признаку скоростные расходомеры подразделяют на крыльчатые и турбинные.

Приборы и оборудование: секундомер; скоростной крыльчатый расходомер; биметаллический термометр; стальной трубопровод постоянного сечения; датчики давления; лабораторный стенд № 1.

Требования техники безопасности при работе на стенде № 1

Работа на лабораторном стенде № 1 (НТЦ–11.91 «Гидродинамика») допускается только в присутствии преподавателя либо лаборанта с обязательным выполнением следующих требований:

– перед включением стенда необходимо убедиться (путем внешнего осмотра) в исправности защитного заземления стенда и целостности соединений трубопроводов;

– для работы стенда необходимо открыть один из шаровых вентилях В1, В5, В8 либо В13 (установлены на столе), с тем, чтобы была обеспечена возможность прохождения жидкости через расходомер Р на слив (в бак). **Следует помнить**, что не допускается продолжительная работа насоса (более 5–10 с) на тупиковую сеть, так как отсутствие протока жидкости может привести к перегреву насоса;

– при возникновении нештатных ситуаций необходимо выключить насосную установку и отключить электрическое питание стенда.

Схема и описание лабораторной установки

В состав лабораторного стенда № 1, принципиальная гидравлическая схема которого приведена на рис. 1.2, входят: насосный агрегат (включает однофазный электродвигатель **М** и центробежный насос **Н**);

гидробак **Б**; четыре объекта испытаний (трубопроводы I–IV); соединительная арматура, включающая шаровые вентили В0–В17. Вентили В1, В5, В8 и В13 с большим проходным сечением ($d_y = 15$ мм) предназначены для подключения трубопроводов к насосу. В ходе выполнения опытов вентиль В0 находится в открытом положении и закрывается только в случае необходимости смены воды в баке **Б**. Остальные вентили предназначены для подключения датчиков давления к соответствующим сечениям стальных трубопроводов.

Информационно-измерительная система стенда включает: четыре электронных датчика давления (Д1–Д4) марки ПД100-ДИ-0,6, манометр **МН**, скоростной расходомер интегрирующего типа **Р**, биметаллический термометр **Т** (ТБП-63 со шкалой 0–120 °С). Измерение времени на стенде осуществляется с помощью специального электронного секундомера с цифровой индикацией результатов. Манометр **МН** служит для контроля давления в напорной линии насоса. Наличие четырех датчиков давления позволяет исследовать все объекты, установленные на стенде. На всасывающей линии насоса установлен мановакуумметр **МВ**.

Стенд имеет замкнутую систему циркуляции жидкости, не требующую постоянного подключения к водопроводу. В качестве рабочей жидкости используется вода. Отображение результатов измерения давления (датчики Д1–Д4) осуществляется на стенде в цифровом виде. Исследуемые трубопроводы (I, III и IV) содержат три местных сопротивления: К – колено (поворот на 90°), ВР – внезапное расширение, ВС – внезапное сужение.

На верхней панели стенда расположены гидравлическая схема стенда, выключатель питания стенда «СЕТЬ», кнопки включения и выключения насоса Н («Пуск» и «Стоп»), цифровые индикаторы результатов измерения давлений с помощью датчиков Д1–Д4 и времени («СЕК»). Для управления секундомером используется тумблер «Разрешение» и кнопка «Сброс». При включении секундомера в положение «Вкл» (верхнее) начинается отсчет времени. При переключении тумблера в положение «Выкл» (нижнее) секундомер останавливается. Для сброса показаний секундомера необходимо нажать кнопку «Сброс».

Основные характеристики стенда: объем гидробака – 0,05 м³; максимальное давление – 0,4 МПа; амплитуда и частота питающего напряжения – 220 В, 50 Гц.

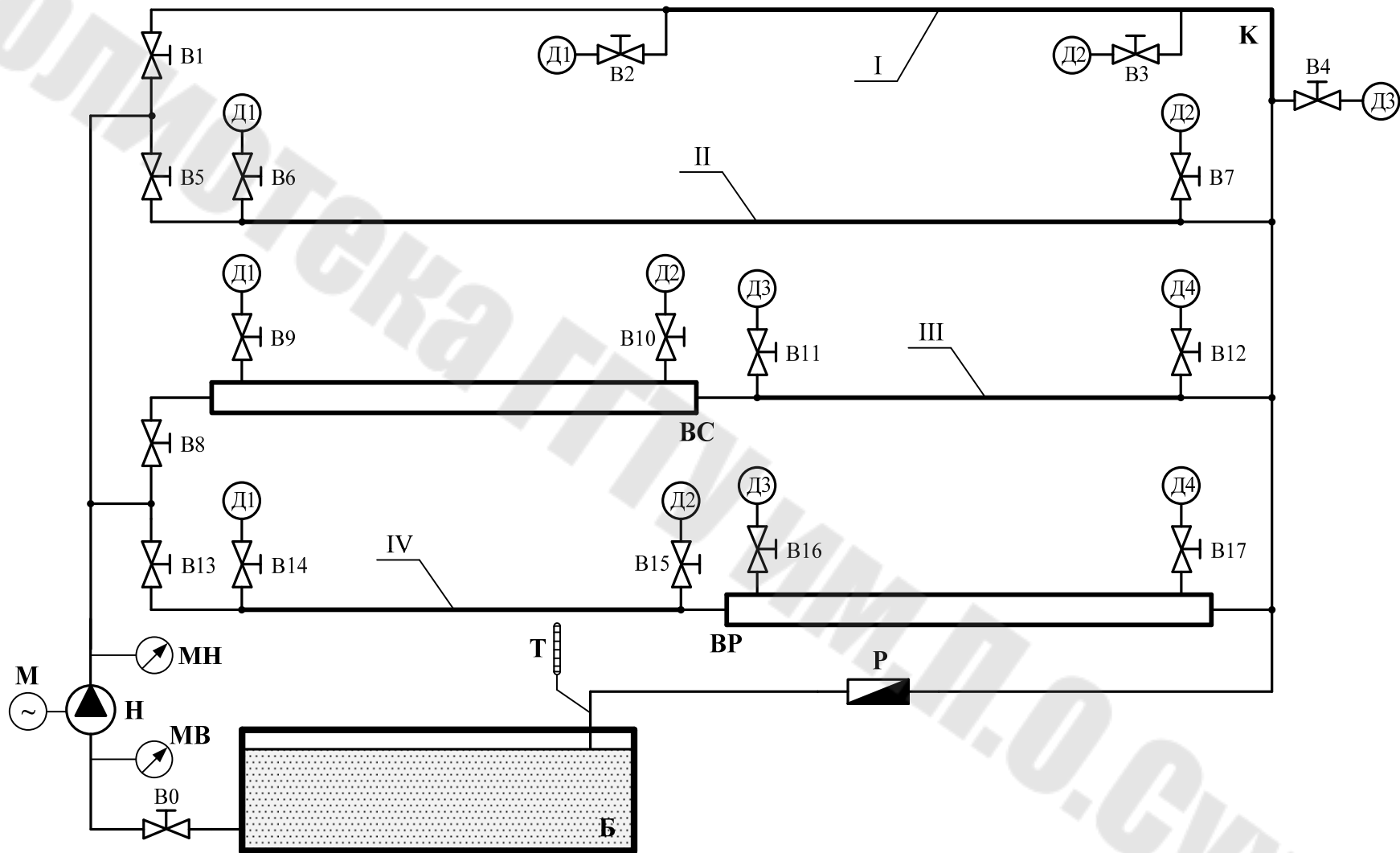


Рис. 1.2. Гидравлическая схема лабораторного стенда № 1

Порядок выполнения работы

1. Объектом испытаний в данной работе является стальной трубопровод постоянного сечения II (рис. 1.3) длиной $l = 1000$ мм и внутренним диаметром $d = 8$ мм.

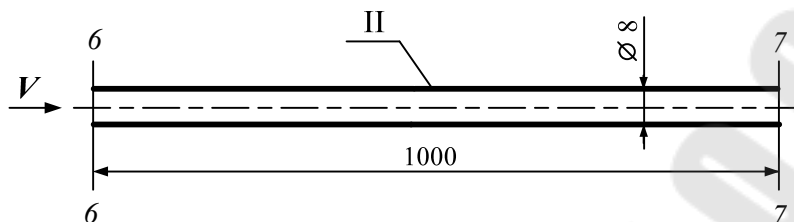


Рис. 1.3. Схема исследуемого трубопровода

2. Перед включением стенда в работу необходимо открыть вентиль В5, а вентили В1, В8 и В13 – закрыть. Затем следует включить электрическое питание стенда («Сеть»), включить насос («Пуск») и дождаться установившегося гидравлического режима (3–5 мин). Далее необходимо при различных расходах провести n опытов (число n задается преподавателем). Изменение расхода осуществляется с помощью вентиля В5. При полностью открытом вентиле по исследуемому участку трубопровода проходит максимальный расход воды; прикрытие вентиля приводит к уменьшению расхода. Не допускается длительная работа насоса при полностью закрытом вентиле (более 5–10 с).

3. В каждом опыте необходимо регистрировать температуру воды t , время τ прохождения через трубопровод заданного объема воды V_w (например, $V_w = 10$ л) и показания датчиков давления Д1 и Д2 ($p_{Д1}$ и $p_{Д2}$), подключенных к сечениям 6–6 и 7–7 трубопровода II (см. рис. 1.2 и 1.3).

4. Результаты измерений занести в табл. 1.1.

Обработка результатов измерений

1. Определить объемный G_v и массовый G_m расходы воды по формулам (1.7) и (1.6), соответственно.

2. Плотность ρ следует находить по значению температуры t при помощи табл. П.1.1 и П.1.2 приложения 1.

3. Рассчитать величину удельных линейных потерь давления в трубопроводе II:

$$r_{\text{тр}} = \frac{p_{Д1} - p_{Д2}}{l}, \text{ кПа/мм.}$$

4. Результаты указанных расчетов для n наборов данных занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	1	2	3	...	n
Температура воды t , °С					
Время прохождения воды τ , с					
Объем воды V_w , м ³					
Показания датчиков давления Д1/Д2, кПа	/	/	/	/	/
Объемный расход воды G_V , м ³ /с					
Массовый расход воды G_m , кг/с					
$r_{тр}$, кПа/мм					

Контрольные вопросы

1. Давление: физическая сущность; абсолютное, избыточное, вакуумметрическое давления.
2. Способы, приборы и единицы измерения давления.
3. Расход: физическая сущность; объемный, весовой и массовый расходы.
4. Способы, приборы и единицы измерения расхода.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЖИДКОСТНЫХ МАНОМЕТРОВ

Цель работы: ознакомиться с различными видами жидкостных манометров; выполнить измерение гидростатического давления при помощи пьезометра.

Краткие теоретические сведения

Для измерения давления в гидросистемах применяются разнообразные приборы, тип и конструкция которых зависят от величины и той точности, которая должна быть обеспечена в результате измерений. Наибольшее распространение получили приборы двух типов: жидкостные и механические. К **жидкостным манометрам** относят

пъезометры, U-образные и чашечные манометры, а также манометры с наклонной трубкой.

Простейшим жидкостным прибором является **пъезометр** (рис. 2.1). В качестве пъезометров используются стеклянные трубки диаметром не менее 5 мм; при меньших диаметрах трубок образуется заметный мениск, искажающий отсчет высоты жидкости в трубках. Нижний конец трубки пъезометра соединяется при помощи специального патрубка с той областью, где должно производиться измерение давления. Верхний конец трубки открыт и сообщается с атмосферой. Трубка обычно помещается на доске с нанесенной на ней измерительной шкалой. Пъезометры используются для измерения небольших давлений (до 2 м вод. ст.).

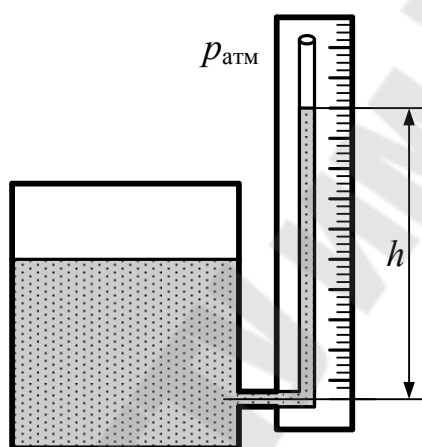


Рис. 2.1. Пъезометр

Жидкость в пъезометре поднимается на пъезометрическую высоту h , м, соответствующую избыточному $p_{изб}$ (манометрическому p_m) давлению:

$$p_{изб} = \gamma h, \quad (2.1)$$

где $\gamma = \rho g$ – удельный вес жидкости, Н/м^3 ; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Для измерения давления до 200 кПа (20 м вод. ст.) при лабораторных гидравлических исследованиях широко используются **U-образные** ртутные манометры (рис. 2.2). Один конец трубки соединяется с областью, в которой необходимо измерить давление, а другой остается открытым, соединенным с атмосферой.

Величина искомого избыточного давления в резервуаре определяется соотношением (2.1), при этом удельный вес ртути при нормальных условиях приблизительно составляет 132886 Н/м^3 .

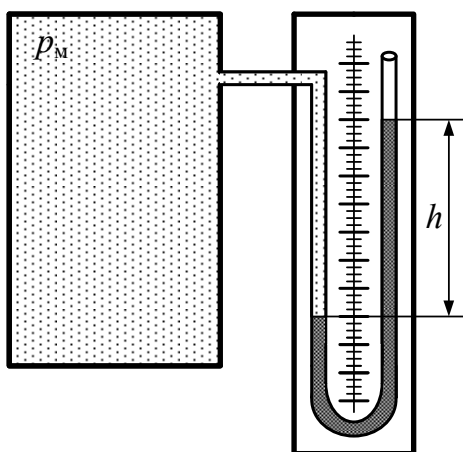


Рис. 2.2. U-образный ртутный манометр

Абсолютное давление в резервуаре:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}}, \text{ Па}, \quad (2.2)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па.

Более удобны в работе **чашечные манометры** (рис. 2.3). Этот прибор является разновидностью U-образного манометра, в котором одно колено заменено чашкой. За нуль шкалы принимается уровень жидкости в чашке. Поперечные размеры чашки значительно больше, чем трубки; поэтому понижением уровня жидкости в чашке при выполнении обычных технологических измерений можно пренебречь, т. е. производить только один отсчет уровня жидкости в одной трубке.

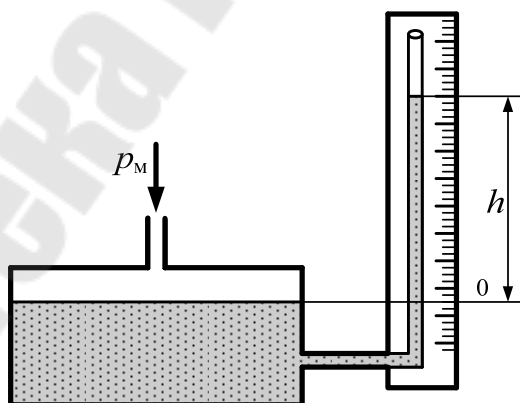


Рис. 2.3. Чашечный манометр

Для измерения малых давлений применяются **жидкостные манометры с наклонной трубкой** (рис. 2.4). Применение наклонной трубки позволяет повысить точность измерений очень малых давлений (см вод. ст.).

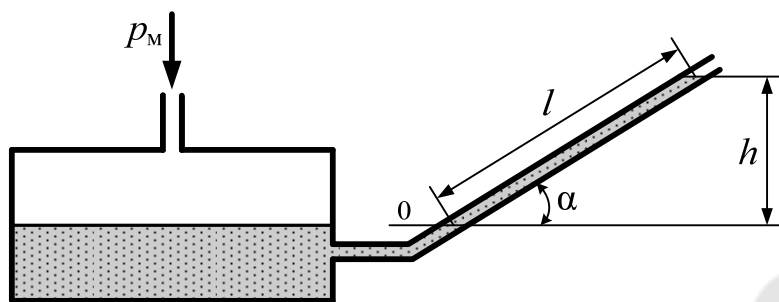


Рис. 2.4. Манометр с наклонной трубкой

Приборы и оборудование: пьезометры; термометр расширения; расходомер; лабораторный стенд № 2.

Требования техники безопасности при работе на стенде № 2

Работа на лабораторном стенде № 2 (опытная установка для исследования гидравлических характеристик и режимов течения жидкости) допускается только в присутствии преподавателя либо лаборанта с обязательным выполнением следующих требований:

- перед включением насосной установки необходимо проверить исправность приводного электродвигателя;
- убедиться в наличии необходимого количества воды в установке, а также проверить надежность монтажа и готовность к работе трубопроводов контура циркуляции жидкости;
- при проведении опыта запрещается выполнение действий, не предусмотренных в разделе «Порядок выполнения работы» и не разрешенных преподавателем либо лаборантом (например, переключение индикаторных трубок пьезометров при работающей установке);
- при возникновении нештатных ситуаций необходимо выключить насос и электрическое питание установки.

Схема и описание лабораторной установки

В состав лабораторного стенда № 2, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.5, входят: гидробак 1; питательная напорная труба 2, на которой установлены пьезометры 1п и 2п; трубопровод переменного сечения 3 (труба Вентури), на характерных участках которого установлены пьезометры 3п–5п; трубопровод 4 с пьезометрами 6п–10п; центробежный насос 5; счетчик 6 для замера расхода воды; вентили 7.

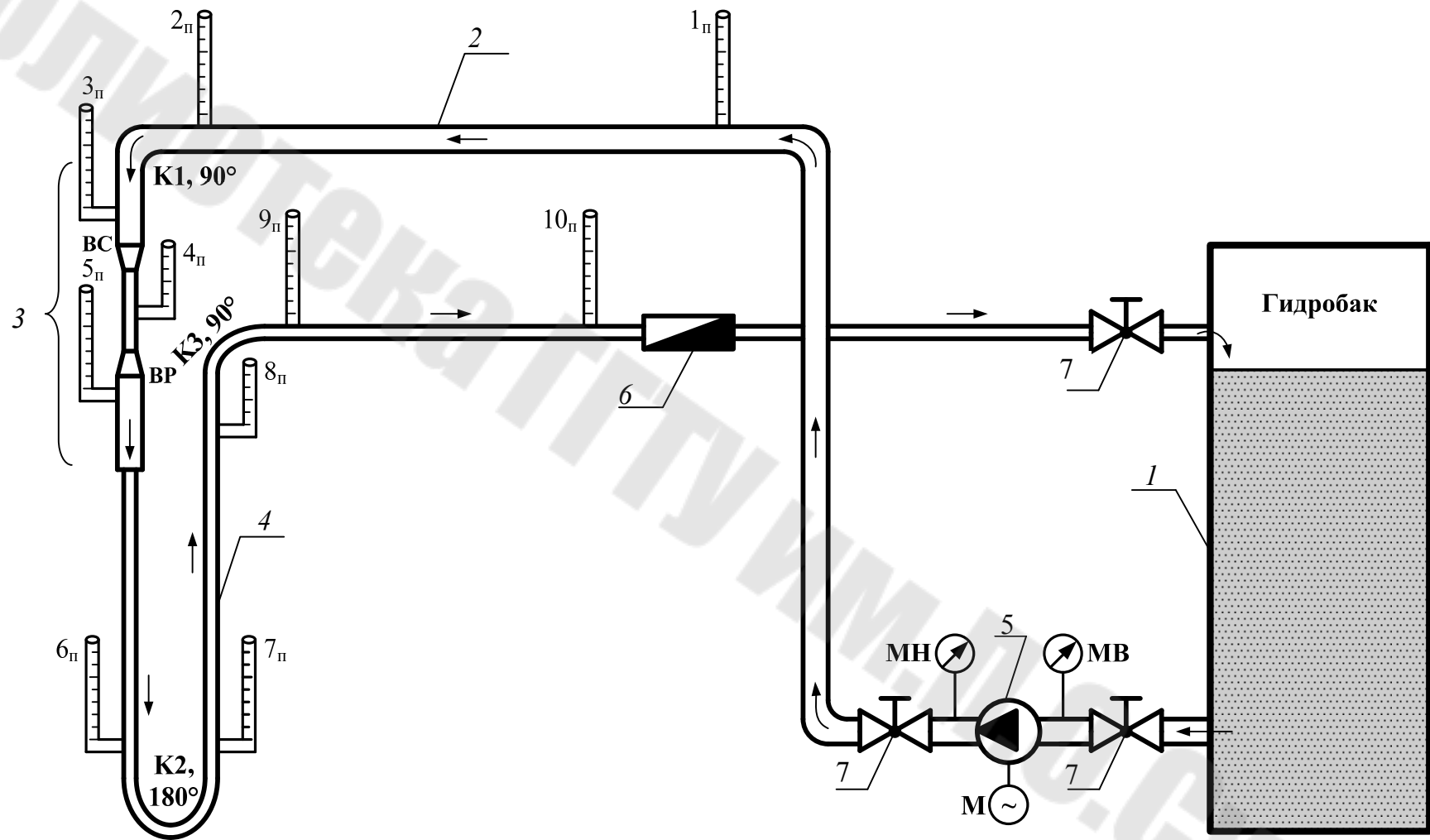


Рис. 2.5. Принципиальная схема лабораторного стенда № 2

Все пьезометры выведены на специальный щит, нуль шкалы которого совпадает с горизонтальной плоскостью сравнения, проходящей через оси трубопроводов 2–4. Значения диаметров сечений исследуемых трубопроводов: $d = 60$ мм для сечений, к которым подключены пьезометры 1п, 2п, 3п, 5п; $d = 35$ мм для сечений, к которым подключены пьезометры 4п, 6п, 7п, 8п, 9п, 10п.

Местные сопротивления трубопроводов стенда № 2:

- трубопровод 2: колено К1 с поворотом на 90° ;
- трубопровод 3: внезапные сужение ВС и расширение ВР;
- трубопровод 4: колено К2 с поворотом на 180° , колено К3 с поворотом на 90° .

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип работы пьезометров 1п–10п.
2. Открыть кран и наполнить гидробак бак 1 водой.
3. Открыть вентили 7, включить насос и дождаться установившегося гидравлического режима (3–5 мин).
4. При помощи термометра измерить температуру воды t , $^\circ\text{C}$, в гидробаке.
5. Определить расход воды в трубе с помощью секундомера и расходомера интегрирующего типа (счетчика б). Для этого после некоторого произвольно выбранного промежутка времени выключить секундомер и зафиксировать объем воды V_w , м^3 , прошедшей через расходомер, и время τ , с.
6. Занести показания пьезометров 1п–10п при данном расходе воды в лабораторный журнал.
7. При помощи вентиля 7 установить новое значение мгновенного расхода воды и повторить действия пунктов 5 и 6, оставляя при этом время измерения τ прежним (см. пункт 5).
8. Аналогичные измерения, предусмотренные в пунктах 5–7, провести для n значений расхода воды (число n задается преподавателем).
9. Результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерений

Номер опыта	Объем воды V_w , м ³	Показание пьезометра, м вод. ст.									
		1п	2п	3п	4п	5п	6п	7п	8п	9п	10п
1											
2											
3											
...											
<i>n</i>											

Обработка результатов измерений

1. Определить объемный расход воды G_V по формуле (1.7).
2. Для указанных преподавателем номеров пьезометров выполнить перевод значений давления, измеренных в м вод. ст., в Па и атм. Необходимую для перевода плотность воды ρ следует определять при помощи табл. П.1.1 и П.1.2 приложения 1 по значению измеренной температуры t .
3. Результаты расчетов представить в виде табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты расчетов

Номер опыта	Показания пьезометра, м вод. ст.	Давление избыточное			Давление абсолютное		
		м вод. ст.	Па	атм	м вод. ст.	Па	атм
1							
2							
3							
...							
<i>n</i>							

Контрольные вопросы

1. Виды и области применения жидкостных манометров.
2. Конструктивные особенности жидкостных манометров.
3. Пьезометры и U-образные ртутные манометры.
4. Чашечные манометры.
5. Манометры с наклонной трубкой.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОЙ ТРУБЕ

Цель работы: выполнить экспериментальное исследование ламинарного, критического и турбулентного режимов движения жидкости в трубопроводе. По опытным данным рассчитать значения чисел Рейнольдса для различных режимов движения жидкости.

Краткие теоретические сведения

Режим движения жидкости определяет характер взаимодействия струй в потоке. Различают **ламинарный** и **турбулентный** режимы, которые переходят друг в друга после наступления неустойчивого **критического** режима в процессе регулирования скорости течения. **Ламинарный** режим – движение без пульсации скоростей струй, при котором поток движется отдельными слоями, а траектории частиц жидкости между собой не пересекаются. **Турбулентный** режим – движение с пульсацией скорости и взаимным перемешиванием струй в потоке; траектории частиц в этом случае представляют сложные линии, пересекающиеся между собой. Гипотезу о существовании двух режимов движения жидкости впервые в 1880 г. выдвинул Д. И. Менделеев. Дальнейшие исследования Н. П. Петрова и опыты О. Рейнольдса подтвердили ее справедливость.

Переход режима движения от ламинарного к турбулентному сопровождается значительным возрастанием потерь напора, что приводит, в конечном итоге, к выбору более мощных насосов и двигателей, т. е. к относительно большим экономическим затратам на приведение жидкости в движение, поэтому важно знать режим движения. Критерием, по которому судят о режиме движения, является безразмерное число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\vartheta l}{\nu}, \quad (3.1)$$

где ϑ – средняя скорость потока, м/с; l – характерный геометрический размер русла, м (для рек за величину l принимается глубина h , для каналов – гидравлический радиус R , для напорных труб – диаметр d); ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с.

Как следует из формулы (3.1), характер режима течения зависит от скорости движения, вязкости жидкости и от геометрических размеров живого сечения потока.

В результате исследований движения жидкости, проведенных Рейнольдсом и другими учеными, в круглых гладких трубах на участках, достаточно удаленных от входа, при отсутствии различных источников возмущения установлено **критическое** число Рейнольдса $Re_{кр} = 2320$. При $Re_{кр} < 2320$ режим движения ламинарный, а при $Re_{кр} > 2320$ – турбулентный. Вместе с тем, при $2320 < Re < 10000$ турбулентный режим течения еще не полностью развит. Здесь зоны турбулентного движения могут перемежаться с зонами ламинарного движения. Такой режим течения иногда называют переходным. Режим движения жидкости оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление и потери потока.

Анализ опытных данных показывает, что потери напора при ламинарном режиме пропорциональны средней скорости потока в первой степени:

$$H_w^л = k_л v, \quad (3.2)$$

где $k_л$ – коэффициент пропорциональности при ламинарном режиме движения.

При турбулентном режиме потери напора пропорциональны средней скорости в степени $n > 1$:

$$H_w^т = k_т v^n, \quad (3.3)$$

где $k_т$ – коэффициент пропорциональности при турбулентном режиме движения.

Различие между ламинарным и турбулентным режимами имеется также и в распределении скоростей в живом сечении потока. При ламинарном режиме распределение скорости по сечению имеет параболический закон (рис. 3.1); при турбулентном режиме закон распределения более сложный (рис. 3.2). При этом средняя скорость в течении

$$v = G_V / f, \quad (3.4)$$

где G_V – объемный расход жидкости, м³/с; f – площадь поперечного сечения, м².

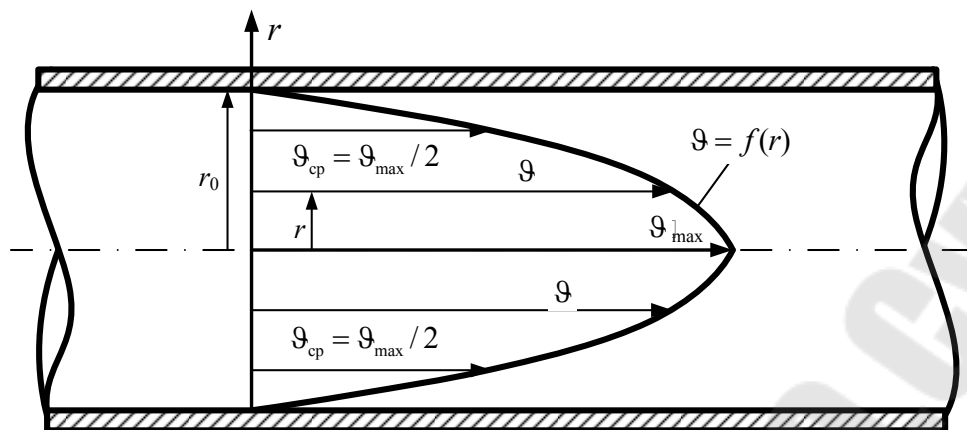


Рис. 3.1. Распределение скорости в поперечном сечении трубы при ламинарном режиме движения жидкости

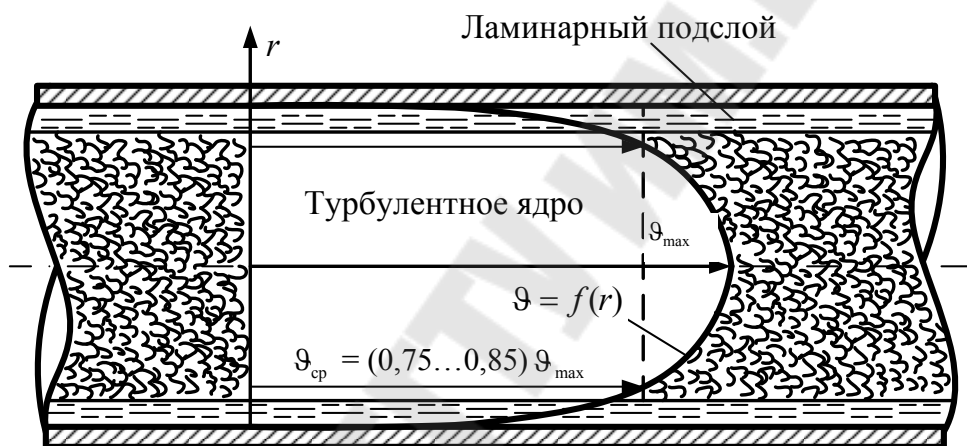


Рис. 3.2. Распределение скорости в поперечном сечении трубы при турбулентном режиме движения жидкости

Приборы и оборудование: электронный секундомер; расходомер; биметаллический термометр; стальной трубопровод постоянного сечения; датчики давления; лабораторный стенд № 1.

Схема и описание лабораторной установки

Объектом испытаний в данной работе является стальной трубопровод постоянного сечения II (см. рис. 1.3) длиной $l = 1000$ мм и внутренним диаметром $d = 8$ мм. Подробное описание гидравлической схемы лабораторного стенда № 1 (см. рис. 1.2), составной частью которого является исследуемый трубопровод II, приведено в лабораторной работе № 1.

Порядок выполнения работы

1. Открыть вентиль В5, а вентили В1, В8 и В13 – закрыть.
2. Включить электрическое питание стенда («Сеть») и центробежный насос («Пуск»).
3. По достижении установившегося гидравлического режима (3–5 мин) измерить температуру воды t , °С.
4. С помощью электронного секундомера измерить время τ прохождения через трубопровод II заданного объема воды V_w , м³.
5. Изменить мгновенное значение расхода воды при помощи вентиля В5, после чего измерить время τ , необходимое для прохождения через исследуемый трубопровод заданного в пункте 4 объема воды.
6. Повторить выполнение 5-го пункта n раз (число опытов n задается преподавателем).
7. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	1	2	3	...	n
Температура воды t , °С					
Объем воды V_w , м ³					
Время прохождения τ , с					
Объемный расход воды G_V , м ³ /с					
Средняя скорость движения воды ϑ , м/с					
Кинематическая вязкость воды ν , м ² /с					
Число Рейнольдса Re					
Режим течения					

Обработка результатов измерений

1. Определить объемный G_V расход воды по формуле (1.7).
2. Найти площадь поперечного сечения трубопровода $f = \pi d^2/4$ и рассчитать среднюю скорость потока по формуле (3.4).
3. По измеренному значению температуры t из табл. П.1.3 приложения 1 определить кинематический коэффициент вязкости воды ν , м²/с.
4. По формуле (3.1) рассчитать число Рейнольдса. В качестве характерного размера l принять значение диаметра d трубопровода.
5. Результаты расчетов занести в табл. 3.1.

Контрольные вопросы

1. Режимы течения жидкости, необходимость и методика их выявления.
2. Распределение скорости в поперечном сечении трубы для ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости.
3. Критерий Рейнольдса. Критическое значение числа Рейнольдса.
4. Расчет средней скорости движения жидкости и потерь напора.
5. Влияние режима течения на потери энергии на трение по длине трубопровода.

Лабораторная работа № 4

ПОСТРОЕНИЕ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОЙ И НАПОРНОЙ ЛИНИЙ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с определением полного напора и его геометрической, пьезометрической и скоростной составляющих; по опытным данным построить напорную и пьезометрическую линии трубопроводов переменного сечения; построить графические зависимости изменения мощности потока по длине трубопровода.

Краткие теоретические сведения

Движение безнапорных и напорных потоков жидкости сопровождается затратами энергии. Для характеристики энергетического состояния потока используют понятие **напора**, измеряемого в метрах. **Полный напор** представляет собой полную удельную (в расчете на единицу веса) энергию. Связь между значениями удельной энергии в двух сечениях трубопровода определяется **уравнением Бернулли**, которое выражает закон сохранения энергии для гидравлических систем.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости при установившемся движении имеет следующий вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_{k1} \vartheta_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_{k2} \vartheta_2^2}{2g} + \Delta H_w \quad (4.1)$$

где Z – высота положения центра тяжести живого сечения потока над произвольной горизонтальной плоскостью сравнения, м; p – давление в центре тяжести рассматриваемого сечения потока, Па; $\gamma = \rho g$ –

удельный вес жидкости, Н/м^3 ; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; α_k – коэффициент Кориолиса или коэффициент кинетической энергии, учитывающий неравномерность распределения скорости в живом сечении потока; ϑ – средняя скорость течения жидкости в живом сечении потока, м/с ; ΔH_w – потери полного напора на преодоление сопротивлений на пути между рассматриваемыми сечениями 1 и 2, м. Потери напора ΔH_w в гидравлических сопротивлениях для установившегося режима подразделяют на линейные (по длине трубопровода) и местные (потери в местных сопротивлениях).

Параметр Z определяет высоту положения центра тяжести живого сечения потока над произвольной горизонтальной плоскостью сравнения 0–0 и называется геометрической высотой или геометрическим напором. Он характеризует удельную (единицы веса жидкости) энергию положения в поле сил тяжести. Отношение p/γ представляет собой высоту такого столба жидкости, который соответствует гидродинамическому давлению в данной точке живого сечения потока и называется пьезометрической высотой H_p . Для измерения этого напора применяются пьезометры – прямые тонкостенные трубки, в которых жидкость поднимается на высоту p/γ . Пьезометрический напор характеризует удельную потенциальную энергию давления в данном сечении потока. Сумма геометрической и пьезометрической высот ($Z + p/\gamma$) называется статическим напором $H_{ст}$ и определяет общий запас удельной потенциальной энергии. Третий член уравнения Бернулли $\alpha_k \vartheta^2/2g$ называется скоростной высотой или скоростным напором $H_в$; он определяет удельную кинетическую энергию жидкости в данном сечении потока.

При движении жидкости по трубопроводу происходит постоянное преобразование ее удельной энергии. При изменении геодезической высоты потока геометрический напор обратимо переходит в пьезометрический, при изменении живого сечения – пьезометрический напор переходит в скоростной и наоборот, и лишь переход пьезометрического напора в «теряемый» напор ΔH_w происходит необратимо.

Коэффициент Кориолиса представляет собой отношение действительной кинетической энергии секундной массы жидкости, протекающей через живое сечение, к кинетической энергии той же массы, условно вычисленной в предположении, что скорость во всех точках

живого сечения равна средней скорости. При турбулентном течении коэффициент Кориолиса можно определить по формуле

$$\alpha_k = 1 + 2,65\lambda, \quad (4.2)$$

где λ – коэффициент Дарси.

Однако во многих случаях (например, при расчете труб и каналов) при турбулентном движении жидкости принимают $\alpha_k \approx 1$; при ламинарном течении – $\alpha_k \approx 2$. Вносимая таким упрощением погрешность является вполне допустимой для технических расчетов.

Геометрический смысл уравнения Бернулли легко уяснить при рассмотрении движущейся жидкости в трубе (рис. 4.1). Отложим вертикально вверх от центра тяжести сечения 1–1 пьезометрическую p_1/γ , а затем скоростную $\alpha_{k1}v_1^2/2g$ высоты; выполним то же самое для сечения 2–2 и других произвольно взятых сечений. Для измерения суммы напоров $(p/\gamma + \alpha_k v^2/2g)$ применяется трубка Пито, конец (носик) которой загнут навстречу потоку (рис. 4.1). Уровень жидкости в этой трубке выше, чем в пьезометре, так как кинетическая энергия движения жидкости у носика трубки преобразуется в потенциальную энергию дополнительного столбика высотой $v^2/2g$.

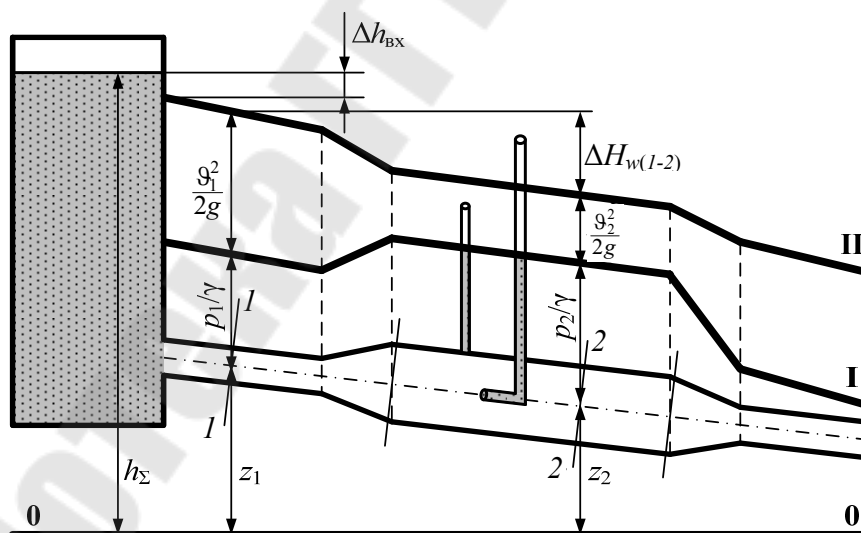


Рис. 4.1. Графическая иллюстрация уравнения Бернулли:
I – пьезометрическая линия; II – линия полного напора

Сумма трех высот $(Z + p/\gamma + \alpha_k v^2/2g)$ называется гидродинамическим или полным напором $H_{гд}$ – кривая II–II. Напорная линия II–II характеризует закон распределения полного напора по длине потока.

Полный напор всегда уменьшается в направлении течения жидкости. Наклон этой линии (изменение на единицу длины трубопровода) называется **гидравлическим уклоном**. Кривая I–I, соединяющая вершины вертикальных отрезков $(Z + p/\gamma)$, называется пьезометрической линией и определяет закон распределения удельной потенциальной энергии потока. Наклон линии I–I называется **пьезометрическим уклоном**.

Гидравлическая мощность и полный напор $H_{гд}$ связаны следующим выражением:

$$N = H_{гд} G_{\gamma} = H_{гд} \gamma G_V, \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

где G_{γ} – весовой расход, Н/с; G_V – объемный расход, м³/с.

Приборы и оборудование: секундомер; расходомеры интегрирующего типа; термометры; датчики давления; пьезометры; лабораторные стенды № 1 и 2.

Схема и описание лабораторной установки

Объектами испытаний в данной работе являются стальные трубопроводы переменного сечения:

- трубопровод IV (рис. 4.2) лабораторного стенда № 1;
- трубопровод 3 (см. рис. 2.5) лабораторного стенда № 2.

Подробные описания схем стендов № 1 и 2 приведены в лабораторных работах № 1 и 2, соответственно.

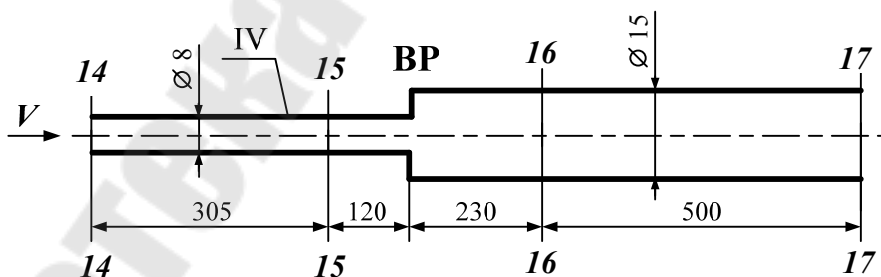


Рис. 4.2. Схема трубопровода IV с внезапным расширением ВР

Все размеры на рис. 4.2 указаны в миллиметрах. Исследованию подлежит участок трубопровода IV от сечения 14–14 до сечения 17–17. Нумерация сечений соответствует номерам шаровых вентилей (см. рис. 1.2). Длина исследуемого участка $l = 1155$ мм. Трубопровод содержит одноместное сопротивление – внезапное расширение ВР.

Представленный на рис. 2.5 трубопровод 3 имеет четыре местных сопротивления: постепенное расширение (ПР), постепенное сужение (ПС), внезапное расширение (ВР) и внезапное сужение (ВС).

Порядок выполнения измерений и обработки опытных данных для лабораторного стенда № 1

1. До включения стенда необходимо:

– открыть вентиль В13 (вентили В1, В5 и В8 должны быть закрыты);

– открыть вентили В14, В15, В16 и В17 и подключить сечения 14–14, 15–15, 16–16 и 17–17 соответственно к датчикам Д1, Д2, Д3 и Д4 (все вентили на остальных трубопроводах должны быть закрыты).

2. Включить питание стенда («СЕТЬ») и насос Н (кнопка «Пуск»). По прошествии 3–5 мин, необходимых для достижения установившегося режима работы установки, выполнить два опыта при различных значениях расхода, изменение которого осуществляется с помощью вентиля В13.

3. Первый опыт необходимо провести при максимальном расходе (при полностью открытом вентиле В13). Во втором опыте необходимо уменьшить расход в два раза. Для этого необходимо прикрыть вентиль В13, наблюдая при этом за скоростью вращения стрелки расходомера Р.

4. В каждом опыте необходимо измерить:

– давления p_1 – p_4 по цифровым индикаторам (Д1, Д2, Д3 и Д4);

– время τ , с, прохождения через расходомер заданного объема воды V_w , м³;

– температуру воды t , °С, по термометру.

5. По окончании измерений рассчитать объемный расход воды G_V , м³/с, по формуле (1.7) и среднюю скорость потока воды ϑ , м/с, по формуле (3.4). При определении значений ϑ следует учитывать, что в сечениях 14–14 и 15–15 внутренний диаметр трубопровода $d = 8$ мм, а в сечениях 16–16 и 17–17 $d = 15$ мм.

6. По значению температуры t из табл. П.1.3 приложения 1 определить кинематический коэффициент вязкости воды ν , м²/с, после чего по формуле (3.1) найти значения чисел Рейнольдса Re в характерных сечениях трубопровода IV.

7. В соответствии с полученными значениями Re определить коэффициент Кориолиса α_k .

8. Для сечений 14–14, 15–15, 16–16 и 17–17 определить геометрический Z , пьезометрический H_p , скоростной H_9 , статический $H_{ст}$ и полный $H_{гд}$ напоры.

Геометрические напоры Z равны значениям вертикальных координат соответствующих сечений (в выбранной системе координат). В связи с тем, что исследуемый трубопровод расположен горизонтально, для всех сечений $Z = \text{const}$. Место расположения плоскости сравнения и, как следствие, величину Z задает преподаватель. Если ось трубопровода расположить на плоскости сравнения, то $Z = 0$.

При вычислении пьезометрических напоров H_p плотность ρ необходимо определять по значению температуры воды t из табл. П.1.2 приложения 1.

9. По формуле (4.3) рассчитать гидравлическую мощность потока N .

10. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

11. Для обоих опытов построить линии полного $H_{гд} = f(l)$ и статического $H_{ст} = f(l)$ напоров, а также зависимость $N = f(l)$.

Таблица 4.1

Результаты исследований гидравлических характеристик

Номер опыта	Сечение трубопровода	Давление p , кПа	Объем воды V , м ³	Время прохождения воды τ , с	Температура воды t , °С	Объемный расход воды G_V , м ³ /с	Средняя скорость движения воды ϑ , м/с	Кинематическая вязкость воды ν , м ² /с	Число Рейнольдса Re	Коэффициент Кориолиса α_k	Геометрический напор Z , м	Пьезометрический напор H_p , м	Скоростной напор H_9 , м	Статический напор $H_{ст}$, м	Полный напор $H_{гд}$, м	Гидравлическая мощность N , Вт
	14–14															
	15–15															
	16–16															
	17–17															

Порядок выполнения измерений и обработки опытных данных для лабораторного стенда № 2

1. Начертить схему трубопровода переменного сечения 3 с указанием геометрических размеров (диаметры сечений и расстояния между ними), а также нумерации пьезометров (сечений).

2. Проверить правильность показаний пьезометров. При отсутствии в них воздуха уровень воды должен быть на одинаковой отметке.

3. Включить в работу насос, подающий воду из гидробака 1 в систему. После заполнения системы водой вентилем 7 на подающей линии задать требуемый расход воды в трубопроводе 3. В случае вытеснения воды из трубок вентилем 7 уменьшить расход.

4. Измерить уровни воды в пьезометрах (статические напоры)
 $H_{ст} = Z + p/\gamma$.

5. Определить величину объемного расхода G_V (m^3/c) с помощью счетчика 6 и секундомера.

6. Вычислить для каждого сечения значения средних скоростей $\vartheta = G_V/f$ и скоростных напоров $H_\vartheta = \vartheta^2/2g$. Здесь f – площадь характерного поперечного сечения трубопровода, m^2 .

7. Суммируя статический $H_{ст}$ и скоростной H_ϑ напоры, определить для каждого сечения величину гидродинамического напора:

$$H_{гд} = H_{ст} + H_\vartheta.$$

8. Определить потери полного напора между сечениями.

9. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.2. По данным таблицы на миллиметровой бумаге в масштабе построить пьезометрическую и напорную линии; на этом же графике (на оси абсцисс) привести схему трубопровода 3.

Таблица 4.2

Напорные характеристики трубопровода переменного сечения

Сечение	l, m	d, m	f, m^2	$\vartheta, m/c$	Z, m	$H_{ст}, m$	H_ϑ, m	$H_{гд}, m$	$\Delta H_w, m$	$N, Вт$
3–3										
4–4										
5–5										

Контрольные вопросы

1. Физический смысл геометрического, пьезометрического, скоростного и полного напоров, методика их экспериментального определения.
2. Уравнение Бернулли. Коэффициент Кориолиса.
3. Гидравлические потери. Удельная энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивлений.
4. Методика построения напорной и пьезометрической линий. Гидравлический и пьезометрический уклоны.
5. Связь полного напора и мощности. Определение потерь напора и мощности.

Лабораторная работа № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ

Цель работы: опытным путем определить коэффициент гидравлического трения в трубопроводе при различных скоростях движения воды; построить график зависимости коэффициента Дарси от числа Рейнольдса.

Краткие теоретические сведения

При движении реальной жидкости в ней возникают силы внутреннего трения, оказывающие сопротивление движению. Гидравлические сопротивления разделяются на **сопротивления по длине** потока и **местные сопротивления**.

Потери напора по длине в круглом трубопроводе при равномерном движении жидкости определяются по **формуле Дарси**:

$$\Delta H_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\vartheta^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где λ – коэффициент сопротивления трения или коэффициент Дарси; l – длина трубопровода, м; d – диаметр трубопровода, м; ϑ – средняя скорость течения жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Величина коэффициента гидравлического трения λ в общем случае является функцией числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости Δ/d , т. е. $\lambda = f(Re, \Delta/d)$, где $Re = \vartheta d/\nu$; Δ – абсолютная

шероховатость, зависящая от материала стенки трубопровода и характера ее обработки. Справочные значения коэффициентов абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_{\text{ср}}$ для трубопроводов, изготовленных из различных материалов, приведены в табл. П.2.1 приложения 2.

При ламинарном режиме движения жидкости, т. е. при $Re < 2320$, коэффициент гидравлического трения λ зависит только от числа Рейнольдса и не зависит от относительной шероховатости:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (5.2)$$

При турбулентном режиме движения, т. е. при $Re > 2320$, возможны следующие основные области сопротивления:

а) область гидравлически гладких труб:

$$2320 < Re < 27(d/\Delta)^{8/7}. \quad (5.3)$$

Здесь выступы шероховатости Δ меньше толщины ламинарного подслоя $\delta_{\text{л}}$, имеющего место у стенок трубы, и коэффициент λ зависит только от числа Рейнольдса.

В этой области коэффициент λ может быть определен по **формуле Конакова**:

$$\lambda = (1,81 \lg Re - 1,5)^{-2} \quad (5.4)$$

либо по **формуле Блазиуса** (при $4000 < Re < 10000$):

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}; \quad (5.5)$$

б) область докватратичного сопротивления:

$$27(d/\Delta)^{8/7} < Re < Re_{\text{кв}}^*. \quad (5.6)$$

В этой области коэффициент λ зависит как от числа Рейнольдса, так и от величины шероховатости, т. е. $\lambda = f(Re, \Delta/d)$.

Здесь выступы шероховатости Δ соизмеримы с толщиной ламинарного подслоя $\delta_{\text{л}}$ и начинают оказывать влияние на коэффициент гидравлического трения λ . В этой области коэффициент λ может быть определен по **формуле Альтшуля**:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}; \quad (5.7)$$

в) область **квадратичного сопротивления**: $Re > Re_{\text{КВ}}^*$.

Здесь ламинарный подслои почти полностью разрушается, обнажая выступы шероховатости. В этой области коэффициент сопротивления λ является функцией только относительной шероховатости Δ/d и не зависит от числа Re . Для определения коэффициента λ в зоне квадратичного сопротивления можно воспользоваться **формулой Никурадзе**:

$$\lambda = \left(1,74 + 2 \lg \frac{d}{2\Delta} \right)^{-2}. \quad (5.8)$$

Число Рейнольдса, соответствующее началу квадратичного сопротивления, можно определить по формуле

$$Re_{\text{КВ}}^* = \frac{191}{\sqrt{\lambda}} \cdot \frac{d}{\Delta}. \quad (5.9)$$

Приборы и оборудование: секундомер; расходомер; термометр расширения; стальной трубопровод постоянного сечения; пьезометры; лабораторный стенд № 2.

Схема и описание лабораторной установки

В настоящей работе исследуются гидравлические характеристики трубопровода 4, входящего в состав стенда № 2. Подробное описание схемы стенда № 2 приведено в лабораторной работе № 2. Трубопровод 4 содержит прямолинейный участок диаметром 35 мм. Полезная длина участка (между точками подключения пьезометров 7п и 8п) составляет 3150 мм.

Порядок выполнения работы и обработки экспериментальных данных

1. Запустить стенд и по достижении установившегося режима, при котором показания пьезометров не изменяются, измерить значения давлений в точках 7п и 8п при n различных расходах воды (число n задается преподавателем).

2. Выполнить измерение температуры t , °С, и объема прошедшей через счетчик воды V_w , м³, за время τ , с. По табл. П.1.3 приложения 1 определить кинематическую вязкость воды ν , м²/с.

3. Для каждого опыта рассчитать значения объемного расхода воды G_V , м³/с, средней скорости ее движения ϑ , м/с, коэффициента гидравлического трения λ и числа Рейнольдса Re .

4. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 5.1.

По данным табл. 5.1 в логарифмических координатах построить зависимость $\lambda = f(Re)$, откладывая на оси абсцисс $\lg Re$, а на оси ординат – $\lg 100\lambda$. Показать на этой кривой пунктирными линиями границы зон сопротивления и дать их названия.

Подставляя в формулу (5.8) найденные из опытов значения коэффициента λ для квадратичной зоны сопротивления, определить абсолютную шероховатость $\Delta_{\text{экс}}$ исследуемого трубопровода и сопоставить ее со справочными значениями $\Delta_{\text{спр}}$ (табл. П.2.1 приложения 2).

Таблица 5.1

Определение гидравлических характеристик

Измеряемые и вычисляемые величины		Номер опыта				
		1	2	3	...	n
1. Диаметр трубопровода d , м						
2. Площадь поперечного сечения трубопровода f , м ²						
3. Длина трубопровода l , м						
4. Температура воды t , °С						
5. Кинематический коэффициент вязкости ν , м ² /с						
6. Показания пьезометра № 7 H_1 , м						
7. Показания пьезометра № 8 H_2 , м						
8. Потери напора по длине $\Delta H_l = H_1 - H_2$, м						
9. Объем воды, прошедшей через счетчик, V_w , м ³						
10. Время τ , с						
11. Расход воды $G_V = V_w/\tau$, м ³ /с						
12. Средняя скорость $\vartheta = G_V/f$, м/с						
13. Экспериментальное значение коэффициента гидравлического трения $\lambda = (2g\Delta H_l d)/(l\vartheta^2)$						
14. Число Рейнольдса $Re = \vartheta d/\nu$						
15. $\lg 100\lambda$						
16. $\lg Re$						
17. Абсолютная шероховатость	По вытекающему из формулы (5.8) соотношению $\Delta_{\text{экс}}$, м					
	По справочным данным $\Delta_{\text{спр}}$, м					

Контрольные вопросы

1. Коэффициент гидравлического трения. Линейные потери напора.
2. Зоны гидравлического сопротивления. Область гидравлически гладких труб.
3. Области доквадратичного и квадратичного сопротивлений.
4. Эмпирические соотношения для определения коэффициента гидравлического трения.
5. Коэффициент абсолютной эквивалентной шероховатости труб.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы: опытным путем определить коэффициенты местных сопротивлений: внезапное расширение и внезапное сужение трубопровода, колено с углом поворота 90° и 180°; сравнить экспериментально полученные значения этих коэффициентов со справочными.

Краткие теоретические сведения

Местные сопротивления – это короткие участки трубопровода, в которых происходят изменения эпюры скоростей потока; например, расширяющиеся и сужающиеся участки трубопровода, повороты в виде колен и отводов, диафрагмы, задвижки, вентили, дроссельные заслонки, клапаны, фильтры и т. д. В результате отрыва потока от стенок и образования водоворотных зон часть механической энергии расходуется, превращаясь в теплоту. Затрачиваемая в местном сопротивлении механическая энергия, отнесенная к единице веса жидкости, называется местной потерей напора.

Местные потери напора ΔH_ξ в гидравлических расчетах принято выражать в долях скоростного напора:

$$\Delta H_\xi = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (6.1)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления; v – средняя скорость в сечении, расположенном ниже по течению за данным сопротивле-

нием, м/с; $\vartheta^2/2g$ – скоростной напор в сечении после местного сопротивления.

Величина коэффициента ξ зависит от формы местного сопротивления, распределения скоростей перед входом в него, условий входа жидкости, числа Рейнольдса и шероховатости стенок. Род жидкости влияет на величину ξ лишь через величину кинематического коэффициента вязкости ν , входящего в число Рейнольдса. Значения коэффициентов ξ для наиболее распространенных видов местных сопротивлений приведены в табл. П.2.2 приложения 2.

Если местные сопротивления расположены на близких друг от друга расстояниях и на разделяющем участке трубопровода эпюра скоростей не успевает стабилизироваться, то происходит **взаимное наложение сопротивлений**. В этом случае общая потеря напора не будет равна сумме потерь напора на изолированных сопротивлениях. Например, при последовательном соединении двух колен (рис. 6.1) в случае (а) – суммарный коэффициент $\xi_{\Sigma} = 3\xi$, а в случае (б) – $\xi_{\Sigma} = 1,45\xi$, где ξ – коэффициент сопротивления изолированного колена.

Взаимное влияние местных сопротивлений в трубопроводе становится заметным, если длина участка между ними меньше $(5-6)d$, где d – внутренний диаметр трубопровода.

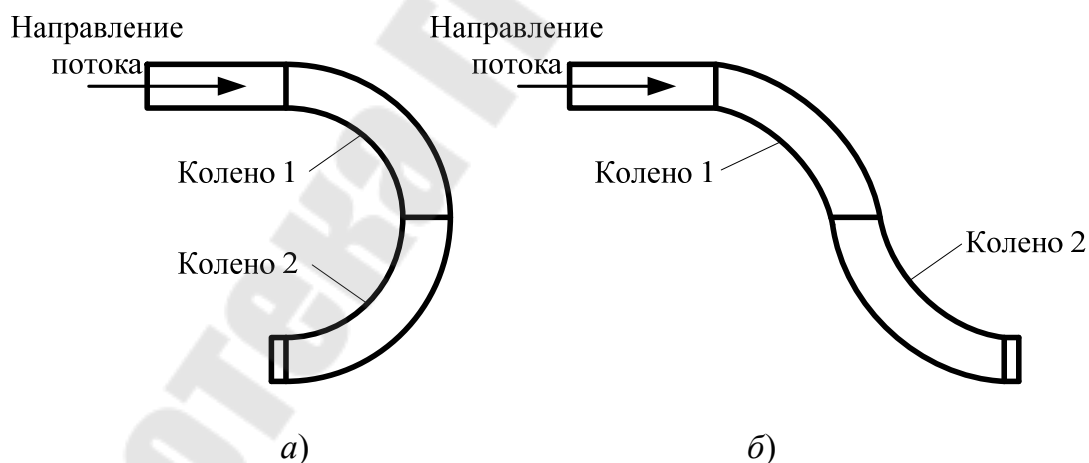


Рис. 6.1. Последовательное соединение двух колен

Потери напора, вызываемые сопротивлением любого типа, определяются с помощью **уравнения Бернулли**:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_{k1}\vartheta_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_{k2}\vartheta_2^2}{2g} + \Delta H_{w2}$$

откуда

$$\Delta H_w = \left[Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_{k1} Q_1^2}{2g} \right] - \left[Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_{k2} Q_2^2}{2g} \right], \quad (6.2)$$

где ΔH_w – сумма потерь, состоящая из потерь напора по длине ΔH_l и местных потерь напора ΔH_ξ .

Для определения местных потерь напора ΔH_ξ необходимо исключить из суммы ΔH_w потери по длине ΔH_l .

Приборы и оборудование: секундомер; расходомеры интегрирующего типа; термометры; датчики давления; пьезометры; стальные трубопроводы переменного и постоянного сечения; лабораторные стенды № 1 и 2.

Схема и описание лабораторной установки

Объектами испытаний в данной работе являются стальные трубопроводы:

– для лабораторного стенда № 1: трубопровод I (рис. 6.2) с коленом К (поворотом на 90°), трубопровод III с внезапным сужением ВС (рис. 6.3) и трубопровод IV с внезапным расширением (см. рис. 4.2);

– для лабораторного стенда № 2: трубопровод 3 (см. рис. 2.5) с внезапным сужением ВС, внезапным расширением ВР, коленом К1 (90°), коленом К2 (180°) и коленом К3 (90°). Все пьезометры стенда № 2 выведены на общий пьезометрический щит, причем ось трубопровода совпадает с началом отсчета пьезометров, т. е. $Z = 0$.

Развернутые описания принципиальных схем стендов № 1 и 2 представлены в лабораторных работах № 1 и 2, соответственно.

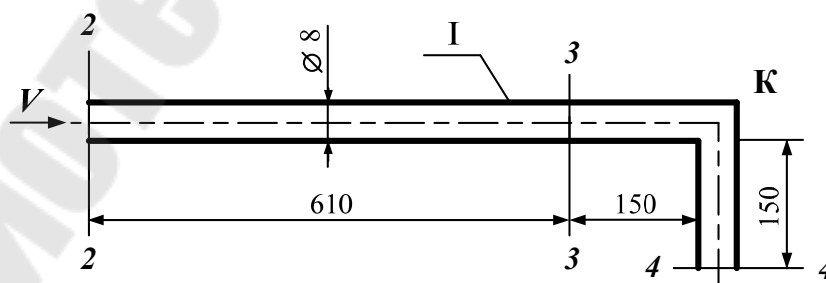


Рис. 6.2. Схема трубопровода I с коленом К (поворотом на 90°)

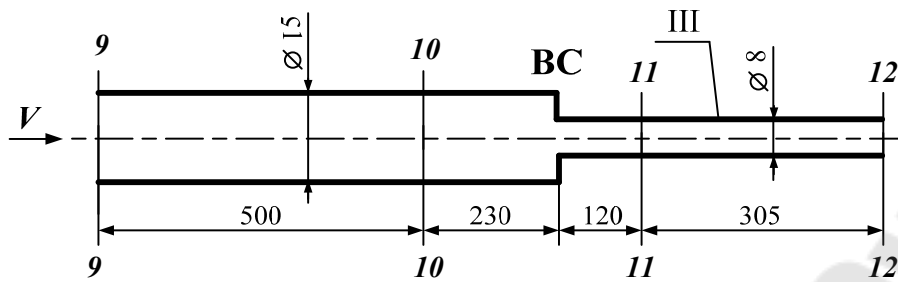


Рис. 6.3. Схема трубопровода III с внезапным сужением ВС

Все размеры на рис. 6.2 и 6.3 указаны в миллиметрах.

Порядок выполнения измерений и обработки опытных данных для лабораторного стенда № 1

1. Операции с вентилями

Трубопровод I с коленом К, 90°:

- открыть вентиль В1, вентили В5, В8 и В13 закрыть;
- открыть вентили В2, В3, В4 и подключить сечения 2–2, 3–3, 4–4 к датчикам Д1, Д2, Д3, соответственно; все вентили на остальных трубопроводах должны быть закрыты;
- включить питание стенда («СЕТЬ»), насос Н (кнопка «Пуск») и по достижении установившегося режима выполнить **три опыта** при различных значениях расхода, изменение которого осуществляется с помощью вентиля В1; первый опыт необходимо провести при максимальном расходе (при полностью открытом вентиле В1).

Трубопровод III с внезапным сужением ВС:

- открыть вентиль В8, вентили В1, В5 и В13 закрыть;
- открыть вентили В9, В10, В11, В12 и подключить сечения 9–9, 10–10, 11–11, 12–12 к датчикам Д1, Д2, Д3, Д4, соответственно; все вентили на остальных трубопроводах должны быть закрыты;
- включить насос Н и по достижении установившегося режима выполнить **три опыта** при различных значениях расхода, изменение которого осуществляется вентилем В8; первый опыт провести при максимальном расходе воды (при полностью открытом вентиле В8).

Трубопровод IV с внезапным расширением ВР:

- открыть вентиль В13, вентили В1, В5 и В8 закрыть;
- открыть вентили В14, В15, В16, В17 и подключить сечения 14–14, 15–15, 16–16, 17–17 к датчикам Д1, Д2, Д3, Д4, соответственно; все вентили на остальных трубопроводах должны быть закрыты;

– включить насос Н и по достижении установившегося режима выполнить **три опыта** при различных значениях расхода, изменение которого осуществляется вентилем В13; первый опыт провести при максимальном расходе воды (при полностью открытом вентиле В13).

2. Снятие и обработка показаний приборов

В каждом опыте необходимо измерить:

– давления в характерных сечениях (p_1 – p_4 по цифровым индикаторам Д1, Д2, Д3 и Д4);

– время τ , с, прохождения через расходомер заданного объема воды V_w , м³;

– температуру воды t , °С.

Результаты измерений занести в табл. 6.1.

Рассчитать объемный расход воды G_V , м³/с, по формуле (1.7) и среднюю скорость потока воды ϑ , м/с, по формуле (3.4).

По значению температуры t из табл. П.1.2 приложения 1 определить плотность воды ρ , кг/м³, после чего по представленным в табл. 6.1 соотношениям выполнить расчет: скоростного H_ϑ и гидродинамического $H_{гд}$ напоров, местных потерь напора ΔH_ξ и коэффициента местного сопротивления ξ . Сопоставить значения коэффициента ξ , найденные опытным путем, со справочными данными по ξ , представленными в табл. П.2.2 приложения 2.

Таблица 6.1

Определение коэффициентов местных сопротивлений

Измеряемые и рассчитываемые параметры	Колено К, 90°		Внезапное сужение		Внезапное расширение	
	Сечение					
	3-3	4-4	10-10	11-11	15-15	16-16
1. Диаметр сечения d , м						
2. Площадь поперечного сечения f , м ²						
3. Средняя скорость $\vartheta = G_V/f$, м/с						
4. Скоростной напор $H_\vartheta = \vartheta^2/(2g)$, м						
5. Гидродинамический напор $H_{гд} = H_{ст} + H_\vartheta$, м						
6. Местные потери напора $\Delta H_\xi = H_i - H_{i+1}$, м (здесь i – номер характерного сечения)						

Измеряемые и рассчитываемые параметры	Колено К, 90°		Внезапное сужение	Внезапное расширение		
	Сечение					
	3-3	4-4	10-10	11-11	15-15	16-16
7. Коэффициент местных потерь по опыту $\xi = (2g\Delta H_{\xi}) / \vartheta^2$						
8. Коэффициент ξ по справочным данным						

Порядок выполнения измерений и обработки опытных данных для лабораторного стенда № 2

1. Запустить установку и снять показания пьезометров для нахождения потерь напора в местных сопротивлениях:

- внезапное сужение ВС: пьезометры 3п и 4п;
- внезапное расширение ВР: пьезометры 4п и 5п;
- колено К1 (90°): пьезометры 2п и 3п;
- колено К2 (180°): пьезометры 6п и 7п;
- колено К3 (90°): пьезометры 8п и 9п.

2. Выполнить **три опыта** для разных расходов воды, варьируемых вентилем 7 на подающей линии стенда № 2 (рис. 2.5).

3. Для указанных в пункте 1 местных сопротивлений (ВС, ВР, К1, К2, К3) выполнить расчеты, аналогичные вышеприведенным расчетам для лабораторного стенда № 1.

4. Для внезапного расширения ВР вычислить потери напора по теоретической формуле Борда:

$$\Delta H_{\text{вр}}^{\text{T}} = \frac{(\vartheta_i - \vartheta_{i+1})^2}{2g}, \quad (6.3)$$

где ϑ_i и ϑ_{i+1} – средние скорости жидкости в i -х сечениях трубопровода, соответственно, до (i) и после ($i+1$) внезапного расширения.

Расчетные значения потерь напора $\Delta H_{\text{вр}}^{\text{T}}$ сравнить с опытными потерями напора для ВР. Определить процент расхождения δ_H между теоретическими и опытными значениями потерь напора при внезапном расширении по формуле

$$\delta_H = \frac{\Delta H_{\text{вр}}^{\text{эксп}} - \Delta H_{\text{вр}}^{\text{T}}}{\Delta H_{\text{вр}}^{\text{T}}} 100 \%. \quad (6.4)$$

Результаты измерений и вычислений представить в виде таблицы, аналогичной табл. 6.1.

Контрольные вопросы

1. Местные сопротивления. Коэффициент местного сопротивления.
2. Определение потерь напора в местных сопротивлениях.
3. Учет взаимного влияния местных сопротивлений.
4. Потери напора при внезапных расширении и сужении трубопровода.
5. Потери напора для колен с углом поворота 90° и 180° .

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ТРУБЫ ВЕНТУРИ

Цель работы: экспериментальным путем определить коэффициент расхода трубы Вентури; построить по опытным данным график зависимости между проходящим по трубе расходом воды и перепадом давлений в ней.

Краткие теоретические сведения

Расход жидкости, газа и пара в напорных трубопроводах при установившемся движении может измеряться при помощи **трубы Вентури**, мерного сопла и мерной диафрагмы. Использование их основано на измерении искусственно создаваемого перепада давления, возникающего в результате сужения проходного сечения трубопровода.

Труба (расходомер) Вентури (рис. 7.1) состоит из цилиндрического патрубка CD , соединенного с трубопроводом коническими вставками BC (короткая) и DE (длинная). Диаметр широких концов конических участков принимается равным диаметру трубопровода, в котором измеряется расход.

Для измерения перепада давления в суженной и широкой частях трубы Вентури применяются обычные пьезометры или дифференциальные манометры. Зависимость между расходом жидкости в трубопроводе и перепадом давления в трубе Вентури может быть легко получена из основных уравнений гидравлики: уравнения Бернулли и уравнения неразрывности потока.

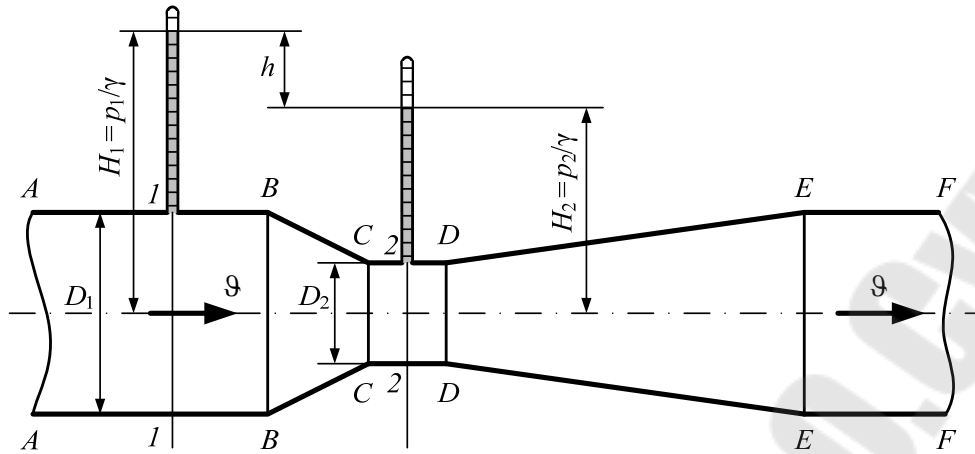


Рис. 7.1. Труба Вентури

Составляя **уравнение Бернулли** для сечений 1 и 2 относительно горизонтальной плоскости сравнения, совпадающей с горизонтальной осью трубы без учета потерь напора на рассматриваемом участке между выбранными сечениями, получим:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (7.1)$$

Скорость v_2 можно выразить через v_1 из уравнения неразрывности потока:

$$v_1 f_1 = v_2 f_2, \quad (7.2)$$

где f_1 и f_2 – площади соответствующих сечений трубы Вентури. Тогда уравнение (7.1) примет следующий вид:

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = \frac{v_1^2}{2g} \left[\left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 - 1 \right]. \quad (7.3)$$

Обозначив $(p_1 - p_2)/\gamma = \Delta H$, уравнение (7.3) запишем в виде:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta H}{\left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 - 1}}. \quad (7.4)$$

С учетом выражения (7.4) теоретический расход в трубопроводе может быть определен по формуле

$$G_T = f_1 \sqrt{\frac{2g\Delta H}{\left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 - 1}}. \quad (7.5)$$

Выражение $f_1 \sqrt{\frac{2g}{(f_1/f_2)^2 - 1}}$ зависит только от геометрических размеров данного расходомера. Если обозначить:

$$A = f_1 \sqrt{\frac{2g}{(f_1/f_2)^2 - 1}}, \quad (7.6)$$

где A – константа расходомера, то выражение (7.5) можно переписать в следующем виде:

$$G_T = A \sqrt{\Delta H}. \quad (7.7)$$

Так как при выводе зависимости (7.7) потери энергии не были учтены, то действительный расход через трубу Вентури G_d будет меньше теоретического расхода G_T , вычисленного по формуле (7.7).

Отношение действительного расхода G_d к теоретическому расходу G_T характеризует **коэффициент расхода трубы Вентури μ** :

$$\mu = G_d / G_T. \quad (7.8)$$

Конечное выражение для определения **действительного расхода** имеет следующий вид:

$$G_d = \mu A \sqrt{\Delta H}. \quad (7.9)$$

Коэффициент расхода трубы Вентури μ зависит от ее размеров, материала, шероховатости поверхности и других факторов и определяется опытным путем. Если на основании опытных данных построить график зависимости $G_d = f(\Delta H)$, то, пользуясь им, можно найти действительный расход по разности показаний пьезометров ΔH , не прибегая к формуле (7.9), тем самым исключая необходимость определения коэффициента расхода μ .

Приборы и оборудование: секундомер; расходомер; термометр расширения; пьезометры; труба Вентури; лабораторный стенд № 2.

Схема и описание лабораторной установки

Труба Вентури (рис. 7.1) является частью напорного трубопровода 3 (см. рис. 2.5), имеющего переменное сечение и входящего в состав стенда № 2. Перепад давлений в горловине расходомера и в его

входной (расширенной) части измеряется при помощи пьезометров 3п (сечение 1–1 на рис. 7.1) и 4п (сечение 2–2 на рис. 7.1), смонтированных на щите. Развернутое описание схемы стенда № 2 приведено в лабораторной работе № 2.

Порядок выполнения работы

1. Опираясь на рис. 7.1, выполнить чертеж трубы Вентури, входящей в состав стенда № 2 в качестве трубопровода 3 (см. рис. 2.5). Сечениям 1–1 и 2–2 на рис. 7.1 отвечают места подключения пьезометров 3п и 4п на рис. 2.5.

2. Проверить отсутствие воздуха в пьезометрах 1п и 2п.

3. Включить центробежный насос, подающий воду в трубопровод 3.

4. Варьируя положение вентиля 7 на подающей линии, установить в трубе Вентури n различных расходов воды, измеряемых с помощью счетчика 6 и секундомера (см. схему на рис. 2.5). Число n задается преподавателем.

5. Снять показания пьезометров 3п и 4п.

6. Результаты измерений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Расходные характеристики трубы Вентури

Номер п/п	Показания пьезометров в сечениях 1 (3п) и 2 (4п)		Разность показаний пьезометров ΔH , м	Теоретический расход воды G_T , м ³ /с	Действительный расход воды G_d , м ³ /с	Коэффициент расхода трубы Вентури μ
	p_1/γ , м	p_2/γ , м				
1						
2						
3						
...						
n						

Обработка результатов измерений

1. Для каждого опыта рассчитать величину $\Delta H = (p_1 - p_2)/\gamma$ и теоретический расход G_T по формуле (7.7). Значение коэффициента A найти по формуле (7.6).

2. Для каждого опыта по формулам (7.8) и (7.9) определить значения коэффициента расхода трубы Вентури μ и действительного расхода G_d .

3. Результаты вычислений занести в табл. 7.1.

4. По найденным значениям расходов G_T , G_d и разности показаний пьезометров ΔH построить графические зависимости $G_T = f(\Delta H)$ и $G_d = f(\Delta H)$.

Контрольные вопросы

1. Схема и принцип работы трубы Вентури.
2. Связь перепада давлений в трубе Вентури с объемным расходом жидкости.
3. Теоретический и действительный расходы жидкости через трубу Вентури.
4. Коэффициент расхода трубы Вентури.

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Цель работы: изучить основные характеристики центробежного насоса; экспериментальным путем определить зависимость напора, мощности и коэффициента полезного действия насоса от подачи; по найденным опытным путем данным построить указанные рабочие характеристики насоса.

Краткие теоретические сведения

Насосы – гидравлические машины, служащие для транспортировки разнообразных жидкостей по напорным трубам. Насосы разделяются на две основные группы: **динамические** и **объемные**. **Динамические насосы** – аппараты, в которых жидкая среда перемещается под силовым воздействием на нее в камере, постоянно сообщаемой со входом и выходом насоса. К ним относят лопастные, трения и инерции, а также электромагнитные насосы. **Объемные насосы** – агрегаты, в которых жидкая среда перемещается путем периодического изменения объема занимаемой ею камеры, попеременно сообщаемой

со входом и выходом насоса. К ним относят возвратно-поступательные, роторные и возвратно-поворотные насосы.

Основными параметрами, характеризующими работу насосов всех типов, являются: напор, производительность, мощность и коэффициент полезного действия (КПД).

Напор – удельная энергия, сообщаемая насосом жидкости. Для определения напора на действующей установке используется эксплуатационная формула:

$$H = \frac{p_M \pm p_{MB}}{\gamma} + z + z_M, \text{ м}, \quad (8.1)$$

где p_M – показание манометра, установленного на нагнетательном патрубке, Па; p_{MB} – показание мановакуумметра, установленного на всасывающем патрубке, Па; γ – удельный вес перекачиваемой жидкости, Н/м³; z – вертикальное расстояние между нагнетательным и всасывающим патрубками насоса, м; z_M – расстояние по вертикали от манометра до точки его подсоединения, м. Если во всасывающей трубе давление выше атмосферного (избыточное давление), то в формуле перед p_{MB} ставят знак «-», если ниже атмосферного (вакуум), то ставят знак «+».

Если сумма $z + z_M$ мала, то напор с достаточной точностью определяется по упрощенной формуле:

$$H = \frac{p_M \pm p_{MB}}{\gamma}. \quad (8.2)$$

При весьма большом напоре (порядка ста и более метров) весьма точное выражение его величины дает показание манометра, выраженное в метрах столба перекачиваемой жидкости $H \approx p_M/\gamma$.

Производительностью (подачей, расходом) Q , м³/с, насоса называется объем жидкости, подаваемый насосом в единицу времени.

Мощностью насоса N называется мощность на его валу (потребляемая мощность). Полезной мощностью N_{Π} называют количество энергии, сообщаемое насосом в единицу времени жидкости, подаваемой им в нагнетательный трубопровод.

Полезная N_{Π} и потребляемая N мощности насоса определяются по выражениям:

$$N_{\Pi} = \gamma Q H, \text{ Вт}; \quad (8.3)$$

$$N = N_{\text{п}}/\eta, \text{ Вт}, \quad (8.4)$$

где η – КПД насоса.

Мощность, потребляемая двигателем, приводящим насос в действие, рассчитывается по формуле

$$N_{\text{дв}} = \frac{NK}{\eta_{\text{п}}}, \text{ Вт}, \quad (8.5)$$

где $K = 1,05 - 1,30$ – коэффициент запаса; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи. При отсутствии передачи, т. е. при непосредственном соединении валов насоса и двигателя, $\eta_{\text{п}} = 1$.

Как следует из формулы (8.4), **коэффициент полезного действия насоса** представляет собой отношение полезной мощности к мощности на валу насоса $\eta = N_{\text{п}}/N$. При работе насоса часть подводимой к нему мощности теряется (превращается в тепло). Эти потери мощности делятся на механические, объемные и гидравлические, которые учитываются соответственно механическим, объемным и гидравлическим КПД. Механический $\eta_{\text{м}}$, объемный η_{V} и гидравлический η_{H} коэффициенты полезного действия называют частными КПД насоса. Они связаны с полным КПД насоса следующим выражением:

$$\eta = \eta_{\text{м}}\eta_{\text{V}}\eta_{\text{H}}. \quad (8.6)$$

Оптимальный режим насоса – режим работы насоса при наибольшем значении КПД. Номинальный режим насоса – режим работы насоса, обеспечивающий заданные технические показатели.

Характеристикой центробежного насоса называется графическое изображение зависимости напора H , потребляемой мощности N и коэффициента полезного действия η насоса от подачи Q при постоянной частоте вращения. Все рабочие характеристики центробежного насоса наносят на общий график, по оси абсцисс откладывая подачу насоса Q , а по оси ординат – значения H , N и η (рис. 8.1). На практике эти характеристики строят на основании испытаний насоса при различной степени открытия задвижки на напорном трубопроводе. Кривые строят не менее чем по 5–6 точкам, т. е. при 5–6 значениях расхода, включая $Q=0$.

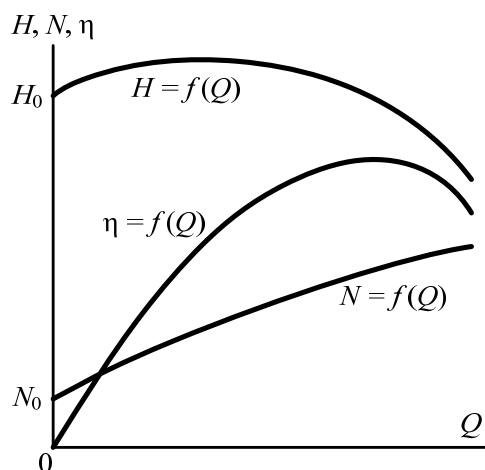


Рис. 8.1. Характеристика центробежного насоса

Теоретическая характеристика насоса $H = f(Q)$ с учетом конечного числа лопаток графически представляет собой прямую линию, которая понижается с увеличением расхода. При течении реальной жидкости в насосе часть энергии расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений: на трение в каналах между рабочими лопатками и в спиральной камере, а также на удар жидкости о лопатки рабочего колеса при входе и выходе с него. С учетом всех этих потерь характеристика представляет собой кривую (рис. 8.1). Характеристика $N = f(Q)$ обычно имеет вид слабо искривленной линии, причем с увеличением расхода мощность также увеличивается. При нулевом расходе $N = N_0$. Нулевой расход насоса обеспечивается в том случае, если задвижка на нагнетательном патрубке полностью перекрыта. При этом мощность насоса (т. е. мощность на его валу) не равна нулю, так как насос затрачивает энергию, получаемую им от электродвигателя, на перемешивание и нагревание жидкости внутри корпуса насоса, без подачи ее в нагнетательный трубопровод. Однако при нулевой подаче мощность все же минимальна. Поэтому центробежный насос пускают в ход при закрытой задвижке. При этом пусковая мощность и пусковой момент минимальны. Это особенно важно при использовании электродвигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором. Если применяемый двигатель имеет большой запас мощности, пуск насоса возможен и при открытой задвижке. При нулевом расходе, т. е. при закрытой задвижке, $\eta = 0$, вследствие равенства нулю полезной мощности. При оптимальном расходе КПД получает максимальное значение и при дальнейшем увеличении производительности насоса несколько снижается.

Приборы и оборудование: секундомер; расходомер; биметаллический термометр; датчики давления; стальной трубопровод постоянного сечения; центробежный насос; лабораторный стенд № 1.

Схема и описание лабораторной установки

Объектом испытаний в данной работе является центробежный насос-автомат Джилекс Джамбо 70/50 П-24, входящий в состав лабораторного стенда № 1. Основные характеристики насоса представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Характеристики насоса Джилекс Джамбо 70/50 П-24

Характеристика	Значение и размерность
Максимальный расход	70 л/мин
Максимальный напор	50 м
Максимальная глубина всасывания	9,5 м
Максимальное количество включений в час	20
Потребляемый ток	5 А
Потребляемая мощность	1,1 кВт

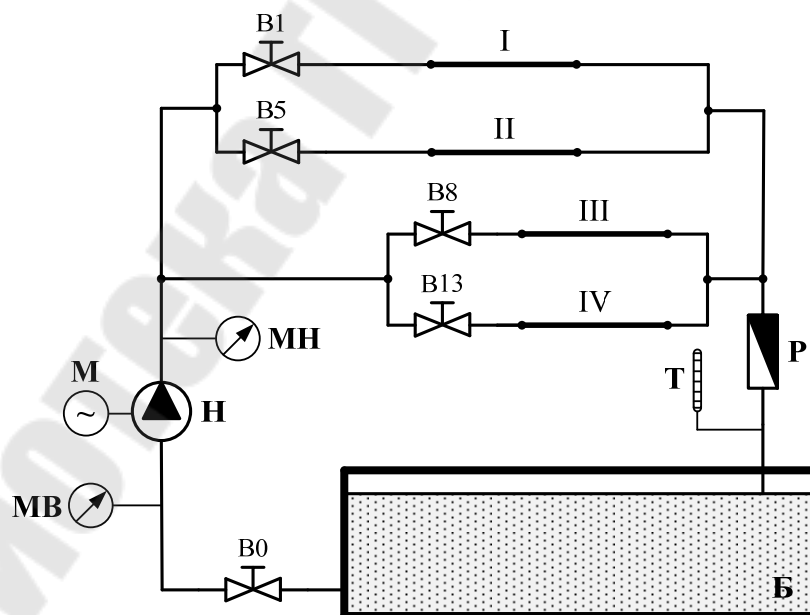


Рис. 8.2. Гидравлическая схема установки для испытания центробежного насоса

Гидравлическая схема установки для испытания центробежного насоса представлена на рис. 8.2. Развернутое описание принципиальной схемы стенда № 1 с расшифровкой принятых обозначений представлено в лабораторной работе № 1.

Порядок выполнения работы

1. Залить воду в бак и заполнить насос **Н** водой.
2. Открыть вентиль **В0** и закрыть вентили **В1**, **В5**, **В8**, **В13**.
3. Включить установку в сеть и запустить насос **Н**.
4. При закрытом вентиле **В5** снять показания мановакуумметра **МВ** ($p_{\text{МВ}}$), манометра **МН** ($p_{\text{МН}}$), ваттметра N_3 (мощность на клеммах электродвигателя **М**), расходомера **Р** (Q) и термометра **Т** (t). Работа установки при закрытых вентилях **В1**, **В5**, **В8** и **В13** не должна превышать 5–10 с.
5. Частично открыть вентиль **В5** и снять показания мановакуумметра $p_{\text{МВ}}$, манометра $p_{\text{М}}$, ваттметра N_3 и расходомера Q .
6. Повторить (7–8 раз) пункт 5, постепенно увеличивая степень открытия вентиля **В5** до 100 %.
7. Закрыть вентиль **В5** и выключить насос, отключить установку от сети.
8. Результаты измерений занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Результаты измерений и вычислений

Характеристика	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Давление по мановакуумметру $p_{\text{МВ}}$, Па								
Давление по манометру $p_{\text{М}}$, Па								
Напор насоса H , м								
Подача насоса Q , м ³ /с								
Полезная мощность $N_{\text{п}}$, Вт								
Мощность на клеммах электродвигателя N_3 , Вт								
Мощность на валу насоса N , Вт								
КПД насоса η , %								

Обработка результатов измерений

1. Определить напор насоса по формуле (8.2). Для нахождения удельного веса жидкости $\gamma = \rho g$ при температуре t воспользоваться табл. П.1.2 приложения 1.

2. Рассчитать полезную мощность насоса по формуле (8.3).

3. Найти мощность на валу и коэффициент полезного действия насоса:

$$N = N_3 \eta_3, \text{ Вт};$$

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N} 100 \%,$$

где η_3 – КПД асинхронного электродвигателя.

4. Результаты вычислений занести в табл. 8.2.

5. Построить экспериментальные характеристики насоса $H = f(Q)$, $N = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$.

Контрольные вопросы

1. Классификация насосов. Ключевые отличия динамических насосов от объемных.

2. Основные показатели работы насосов. Соотношения для определения напора и производительности насоса.

3. Условия запуска центробежного насоса.

4. Рабочая характеристика насоса.

5. Потребляемая и полезная мощности насоса.

Литература

1. Лиходиевский, В. Л. Гидрогазодинамика : лаборатор. практикум по одноим. курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / В. Л. Лиходиевский, Е. Н. Волкова, Ю. А. Степанишина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 47 с.
2. Михальцов, А. П. Методические указания к выполнению лабораторных работ на стенде НТЦ–11.91 «Гидродинамика» / А. П. Михальцов, В. И. Мрочек. – Могилев, 2014. – 20 с.
3. Гидравлика и гидравлические машины : лаборатор. практикум / Н. Г. Кожевникова [и др.]. – СПб. : Лань, 2016. – 352 с.
4. Жуков, Н. П. Гидрогазодинамика / Н. П. Жуков. – Тамбов : ТГТУ, 2011. – 92 с.
5. Кулагин, В. А. Гидрогазодинамика : учеб. пособие / В. А. Кулагин, Е. П. Грищенко. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 275 с.
6. Яхонтов, С. А. Гидрогазодинамика / С. А. Яхонтов. – М. : МЭИ, 1980. – 75 с.
7. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика : учеб. для вузов / Д. В. Штеренлихт. – 5-е изд. – СПб. : Лань, 2015. – 656 с.
8. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) / А. Д. Гиргидов. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 704 с.
9. Медведев, В. Ф. Гидравлика и гидравлические машины / В. Ф. Медведев. – Минск : Выш. шк., 1998. – 311 с.
10. Примеры расчетов по гидравлике : учеб. пособие для вузов / под ред. А. Д. Альтшуля. – М. : Стройиздат, 1977. – 255 с.
11. Гидравлика, гидромашин и гидропневмопривод : учеб. пособие для вузов / под ред. С. П. Стесина. – 3-е изд. – М. : Академия, 2007. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П.1.1

Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$C_p,$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$v,$ $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	$\lambda,$ $10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\mu,$ $10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\nu,$ $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
0	0,00061	4,218	1,0002	55,13	1786,5	1,789	13,67
10	0,00123	4,193	1,0004	57,56	1304,4	1,306	9,52
20	0,00234	4,182	1,0018	59,9	1003,5	1,006	7,02
30	0,00424	4,178	1,0044	61,8	800,7	0,805	5,42
40	0,00738	4,179	1,0079	63,4	652,7	0,659	4,31
50	0,01234	4,181	1,0121	64,8	548,8	0,556	3,54
60	0,01992	4,184	1,0171	65,9	469,4	0,478	2,98
70	0,03117	4,189	1,0228	66,8	405,7	0,415	2,55
80	0,04736	4,196	1,0290	67,5	354,8	0,365	2,21
90	0,07011	4,205	1,0359	68,0	314,6	0,326	1,95
100	0,10132	4,217	1,0435	68,3	282,2	0,295	1,75
110	0,14326	4,230	1,0515	68,5	258,7	0,272	1,60
120	0,19854	4,245	1,0603	68,6	237,6	0,252	1,47
130	0,27011	4,264	1,0697	68,6	217,6	0,233	1,36
140	0,3614	4,286	1,0798	68,5	200,9	0,217	1,26
150	0,4760	4,311	1,0906	68,4	186,2	0,203	1,17
160	0,6180	4,346	1,1021	68,3	173,5	0,191	1,10
170	0,7920	4,372	1,1144	67,9	162,7	0,181	1,04
180	1,0027	4,409	1,1275	67,5	152,9	0,173	1,00
190	1,2553	4,451	1,1415	67,0	144,1	0,165	0,96
200	1,5551	4,498	1,1565	66,3	136,2	0,158	0,93
210	1,9080	4,552	1,1726	65,5	130,3	0,152	0,91
220	2,3201	4,614	1,1900	64,5	124,5	0,148	0,89
230	2,7979	4,686	1,2087	63,7	119,6	0,143	0,88
240	3,3480	4,769	1,2291	62,8	114,7	0,141	0,87
250	3,9776	4,866	1,2512	61,8	108,8	0,137	0,86
260	4,694	4,981	1,2755	60,5	105,8	0,135	0,87
270	5,505	5,118	1,3023	59,0	101,9	0,133	0,88
280	6,419	5,280	1,3321	57,5	98,0	0,131	0,90
290	7,445	5,490	1,3655	55,8	94,1	0,129	0,93
300	8,592	5,750	1,4036	54,0	91,1	0,128	0,97
310	9,870	6,100	1,4470	52,3	88,2	0,128	1,03

Окончание табл. П.1.1

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$C_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\nu, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	$\lambda, 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\mu, 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
320	11,290	6,560	1,4990	50,6	85,3	0,128	1,11
330	12,865	7,210	1,5620	48,4	81,3	0,127	1,22
340	14,608	8,160	1,6390	45,7	77,4	0,127	1,39
350	16,537	9,800	1,7410	43,0	72,5	0,127	1,60
360	18,674	13,98	1,8940	39,5	66,6	0,126	2,35

Таблица П.1.2

Плотность воды при давлении 0,2 МПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
0	1000	16	999,0	32	995,1	48	989,0	64	981,1	80	971,8
1	1000	17	998,8	33	994,8	49	988,5	65	980,6	81	971,2
2	1000	18	998,6	34	994,4	50	988,1	66	980,1	82	970,6
3	1000	19	998,5	35	994,1	51	987,6	67	979,5	83	970,0
4	1000	20	998,3	36	993,7	52	987,2	68	979,0	84	969,3
5	1000	21	998,0	37	993,4	53	986,7	69	978,4	85	968,7
6	1000	22	997,8	38	993,0	54	986,2	70	977,8	86	968,0
7	1000	23	997,6	39	992,6	55	985,7	71	977,2	87	967,4
8	999,9	24	997,3	40	992,3	56	985,3	72	976,7	88	966,7
9	999,8	25	997,1	41	991,9	57	984,8	73	976,1	89	966,0
10	999,7	26	996,8	42	991,5	58	984,3	74	975,5	90	965,4
11	999,6	27	996,6	43	991,1	59	983,8	75	974,9	91	964,7
12	999,5	28	996,3	44	990,7	60	983,3	76	974,3	92	964,0
13	999,4	29	996,0	45	990,3	61	982,7	77	973,7	93	963,3
14	999,3	30	995,7	46	989,8	62	982,2	78	973,1	94	962,6
15	999,1	31	995,4	47	989,4	63	981,7	79	972,5	95	961,9

Таблица П.1.3

Кинематическая вязкость чистой и сточной воды

$t, ^\circ\text{C}$	Чистая вода	Сточная вода	$t, ^\circ\text{C}$	Чистая вода
	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$			$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
0	1,79	—	30	0,81
6	1,47	1,67	40	0,60
8	1,38	1,56–1,73	50	0,56

Окончание табл. П.1.3

$t, ^\circ\text{C}$	Чистая вода	Сточная вода	$t, ^\circ\text{C}$	Чистая вода
	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$			$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
10	1,31	1,47–1,61	60	0,48
12	1,23	1,38–1,52	70	0,42
14	1,17	1,31–1,42	80	0,37
16	1,11	1,23–1,34	90	0,33
20	1,01	1,11–1,20	100	0,29

Приложение 2

Таблица П.2.1

Коэффициенты абсолютной эквивалентной шероховатости трубопроводов, изготовленных из различных материалов

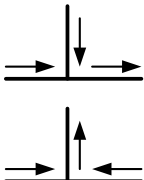
Материал и вид трубы	Состояние трубы	$\Delta_{\text{спр}}, \text{ мм}$
Бесшовные стальные трубы	Новые и чистые, тщательно уложенные	0,01–0,02
	После нескольких лет эксплуатации	0,15–0,30
Стальные трубы сварные	Новые и чистые	0,03–0,10
	С незначительной коррозией после очистки	0,1–0,2
	Умеренно заржавевшие	0,3–0,7
	Старые заржавевшие	0,8–1,5
	Сильно заржавевшие либо с большими отложениями	2,0–4,0
Клепаные стальные трубы	Легко клепаные	0,5–3,0
	Сильно клепаные	До 9,0
Тянутые трубы из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0–0,002
Медные трубы	Новые, технически гладкие	0,0015
Полипропиленовые трубы	Новые	0,003–0,005
Оцинкованные железные трубы	Новые и чистые	0,1–0,2
	После нескольких лет эксплуатации	0,4–0,7
Чугунные трубы	Новые асфальтированные	0–0,16
	Новые без покрытия	0,2–0,5
	Бывшие в эксплуатации	0,5–1,5
	Очень старые	До 3,0

Окончание табл. П.2.1

Материал и вид трубы	Состояние трубы	$\Delta_{\text{спр}}$, мм
Бетонные трубы	Новые из предварительно-напряженного бетона	0–0,05
	Новые центробежные	0,15–0,30
	Бывшие в эксплуатации	0,3–0,8
	Из необработанного бетона	1,0–3,0

Таблица П.2.2

Значения коэффициентов местных сопротивлений

Наименование гидравлического сопротивления	Коэффициент местного сопротивления ξ
Вентили проходные $d = 40-4-400$ мм	4,0–8,0
Задвижки нормальные	0,3–0,5
Кран пробковый (открытие 30°)	5,0–7,0
Компенсатор гнутый	1,7–2,0
Компенсатор сальниковый	0,2
Угольник 90°	1,0–2,0
Колено 90° , $R = 4d$	0,3
Входная насадка	0,5–1,0
Входная насадка с плавным изменением сечения	0,3–0,6
Внезапное расширение потока	1,0
Внезапное расширение (вход в гидробак и т. д.)	0,8–0,9
Внезапное сужение (выход из гидроцилиндра и т. д.)	0,5–0,7
Распределитель золотниковый	3,0–5,0
Обратный и предохранительный клапаны	2,0–3,0
Дроссель	2,0–2,2
Самозапирающаяся муфта	1,0–1,5
Редукционный клапан	3,0–5,0
Фильтр	2,0–3,0
Штуцер, переходник	0,10–0,15
Закругленное колено	0,14–0,30
Прямое колено	1,3–1,5
Тройник (поток встречный)	3,0
Тройник прямой (поток складывается)	0,5–0,6
	1,0–2,5

Наименование гидравлического сопротивления	Коэффициент местного сопротивления ξ
Тройник прямой (поток расходится) 	0,9–1,2 1,0–1,5
Тройник прямой (поток проходящий) 	0,1

Содержание

Введение.....	3
<i>Лабораторная работа № 1. Определение давления и расхода жидкости</i>	4
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование работы жидкостных манометров</i>	11
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование режимов течения жидкости в напорной трубе</i>	18
<i>Лабораторная работа № 4. Построение пьезометрической и напорной линий для трубопроводов переменного сечения</i>	22
<i>Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента гидравлического трения</i>	29
<i>Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента местных сопротивлений</i>	33
<i>Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента расхода трубы Вентури</i>	39
<i>Лабораторная работа № 8. Определение характеристик центробежного насоса</i>	43
Литература	50
Приложения	51

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА

Практикум

**по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине для студентов
специальностей 1-43 01 05 «Промышленная
теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая
эксплуатация энергооборудования организаций»
дневной и заочной форм обучения**

Составители: **Шаповалов Александр Валерьевич**
Киселевич Валентин Владимирович

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 14.02.20.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,23.

Изд. № 13.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель