

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и рациональное использование водных ресурсов»

Р. Н. ВОСТРОВА, П. Г. СЫЦКО, О. К. НОВИКОВА

ГИДРАВЛИКА

Лабораторный практикум

Гомель 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и рациональное использование водных ресурсов»

Р. Н. ВОСТРОВА, П. Г. СЫЦКО, О. К. НОВИКОВА

ГИДРАВЛИКА

Лабораторный практикум

*Одобрено советом строительного факультета
и методической комиссией факультета безотрывного обучения*

Гомель 2011

УДК 621.1(075.8)
ББК 31.3
В95

Рецензент – ст. преподаватель кафедры «Электроподвижной состав»
В. М. Лазеев (УО «БелГУТ»).

Вострова, Р. Н.

В95 Гидравлика : лаб. практ. / Р. Н. Вострова, П. Г. Сыцко, О. К. Новикова ;
М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель :
БелГУТ, 2011. – 46 с.
ISBN 978-985-468-821-3

Рассмотрены теоретические вопросы, связанные с выполнением лабораторных работ по гидравлике, дано описание экспериментальных установок, приведены порядок проведения опытов и обработки экспериментальных данных.

Предназначен для студентов, обучающихся по техническим специальностям факультета безотрывного обучения

УДК 621.1 (075.8)
ББК 31.3

ISBN 978-985-468-821-3

© Вострова Р. Н., Сыцко П. Г., Новикова О.К., 2011

© Оформление. УО «БелГУТ», 2011

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, предварительно ознакомившиеся с техникой безопасности и охраной труда, ее основным содержанием по методическим указаниям и рекомендуемой литературе.

Уровень теоретической подготовки перед проведением лабораторной работы проверяется устным опросом.

Экспериментальная часть работы проводится с разрешения преподавателя или технического персонала кафедры после ознакомления с лабораторной установкой, измерительными приборами и методикой проведения опытов.

Отчет по каждой отдельной работе составляется студентом на специальном типографском бланке. Записи в упомянутом бланке должны быть сделаны чернилами и отчет подписан студентом, с указанием даты проведения лабораторной работы.

В начале следующего лабораторного занятия студент сдает преподавателю законченный отчет по выполненной работе, без чего студент не допускается к дальнейшим практическим занятиям.

Отчет о лабораторной работе должен быть защищен студентом в установленные сроки. При защите отчета студент обязан знать основные теоретические сведения, содержание, порядок выполнения работы и ответить на поставленные контрольные вопросы.

Студенты, не получившие зачет по лабораторным работам в часы, отведенные расписанием, должны получить его в дополнительное время на консультации.

Студенты, пропустившие занятие в лаборатории, выполняют работу (после получения разрешения заведующего кафедрой) по особому, дополнительному расписанию.

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы:

- ознакомиться с устройством приборов для измерения гидростатического давления;
- приобрести навыки измерения и расчета гидростатического давления в любой точке жидкости.
- изучить устройство грузопоршневого манометра и произвести проверку прижимного манометра.

Краткие сведения из теории

Жидкость, находящаяся в покое, подвергается действию внешних сил двух категорий: массовых (силы тяжести, силы инерции) и поверхностных (силы давления).

Под действием внешних сил в каждой точке жидкости возникают внутренние силы, характеризующие ее напряженное состояние. Напряжения, возникают под действием внешних сил, называются гидростатическим давлением, или просто давлением, и обозначаются буквой p .

Гидростатическое давление измеряется отношением силы гидростатического давления p к рассматриваемой площади ω . Оно может быть измерено также высотой столба какой-либо жидкости (водяного или ртутного). Давление столба жидкости высотой h при плотности жидкости ρ

$$p_0 = \rho gh, \quad (1.1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

h – высота столба жидкости, м.

Гидростатическое давление в любой точке рассматриваемого объема жидкости находят, пользуясь основным уравнением гидростатики

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.2)$$

где p_0 – давление, действующее на свободную поверхность жидкости, Н/м^2 ;

h – глубина погружения точки под уровень, м.

Давление p , получаемое из основного уравнения гидростатики, называется **абсолютным** ($p_{\text{абс}}$). Разность между абсолютным и атмосферным ($p_{\text{а}}$) давлениями называется **избыточным** или **манометрическим** (сверхатмосферным) давлением ($p_{\text{изб}}$). Давление на

жидкость ниже атмосферного называется *вакууметрическим* ($p_{\text{вак}}$), т.е. вакуум – это недостаток давления до атмосферного.

$$P_{\text{абс}} = P_a + P_{\text{изб}}; P_{\text{вак}} = P_a - P_{\text{абс}}. \quad (1.3)$$

За единицу давления в СИ принято давление, при котором на площадь 1 м^2 действует сила, равная 1 Н , т.е. 1 Н/м^2 . Эта единица давления называется паскалем (Па). Наряду с этой единицей давления применяют укрупненные единицы: килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа).

$$1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа}.$$

В технике в настоящее время продолжают применять также систему единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда), в которой за единицу давления принимается 1 кгс/см^2 . Используют и внесистемную единицу – техническую атмосферу (ат); $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10000 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} \approx 10000 \text{ мм вод. ст.} = 735 \text{ мм рт. ст.}$

Для измерения давления применяют пьезометры, жидкостные и механические манометры и вакуумметры.

Описание экспериментальной установки

Способы измерения гидростатического давления изучаются на установке для проверки пружинных манометров (рисунок 1.1).

Пружинные манометры можно проверить путем сравнения их показаний с показаниями образцового манометра либо с помощью грузопоршневого манометра. Принципиальная схема грузопоршневого манометра типа МОП-60 для проверки технических манометров показана на рисунке 1.1. Технические данные установки: масса поршня $m_{\text{п}} = 1 \text{ кг}$, площадь поршня $\omega = 1 \text{ см}^2$.

Действие прибора основано на уравнивании измеряемого давления, передаваемого через гидравлическую среду, весом поршня (П) и грузов (Г), уложенных на нем.

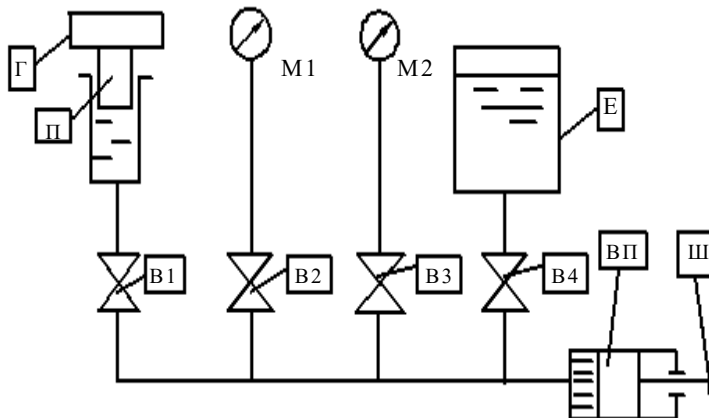


Рисунок 1.1 – Схема установки для проверки пружинных манометров

Давление в гидравлической среде создается воздействием штурвала (Ш) на вспомогательный поршень (ВП) при открытых вентилях В1, В2, В3 и закрытом В4.

Если масса поршня равна $m_{п}$, масса грузов – $m_{г}$, а площадь поршня – ω , то давление на поверхности жидкости непосредственно под нижней кромкой поршня

$$p = (m_{п} + m_{г}) \frac{g}{\omega}. \quad (1.4)$$

Так как по закону Паскаля давление, приложенное к поверхности жидкости, передается без изменения всем её точкам, то точно такое же давление создается и в каналах под проверяемыми манометрами М1 и М2 на уровне нижней кромки поршня.

Сравнивая действительное давление, показанное каждым манометром, с расчетным по формуле (1.4), можно оценить их погрешность.

Разность между показанием манометра и действительным значением измеряемого давления называется **абсолютной погрешностью**. Погрешность показания, выраженная в долях или процентах от верхнего предела измерения, называется **приведенной погрешностью**. Если погрешность выражена в процентах или долях от показания манометра, то она называется **относительной погрешностью**. Величина, выраженная числом, которое равно приведенной погрешности, выраженной в процентах, называется **классом точности**.

Манометр считается исправным, если его погрешность меньше допускаемой, соответствующей классу точности прибора.

Порядок проведения опытов

- 1 Подготовить таблицу для записи опытных и расчетных данных.
- 2 Подготовить прибор к работе, для чего открыть вентиль В4, закрыть вентили В1, В2 и В3, вращая штурвал Ш, отвести вспомогательный поршень в правое крайнее положение. Затем закрыть вентиль В4 и открыть вентили В2 или В3 и В1.
- 3 Уложить на поршень П требуемый груз и, вращая штурвал влево, засечь момент начала подъема поршня, после чего записать массу груза и показания манометра.

4 Повторить опыты несколько раз, постепенно увеличивая массу груза на поршне и записывая массу груза (нарастающим итогом) и показания манометра.

5 Сбросить давление в системе, для чего открыть вентиль В4 и произвести проверку нуля прибора.

Обработка экспериментальных данных

1 Определить давление, создаваемое в гидравлической среде грузопоршневого манометра по весу поршня и грузов, уложенных на нем, по формуле (1.4).

2 Перевести показания пружинного манометра из технической системы (МКГСС) в СИ.

3 Вычислить абсолютную, относительную и приведенную погрешности:

$$|\Delta| = p_m - p; \quad \delta_{\text{отн}} = \frac{|\Delta|}{p} \cdot 100\%; \quad \delta_{\text{пр}} = \frac{|\Delta|}{N} \cdot 100\%, \quad (1.5)$$

где N – шкала манометра.

4 Опытные данные и вычисления свести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Опытные данные и результаты расчетов

Номер опытов	Паспортные данные испытываемого манометра		Опытные данные		Расчетные данные				
	класс точности	N , кПа	m_r , кг	p_m , кПа	p	p_m	$ \Delta $	$\delta_{\text{отн}}$	$\delta_{\text{пр}}$
					кПа			%	

Содержание отчета

1 Схема грузопоршневого манометра.

2 Таблица с опытными и расчетными данными.

3 Расчеты по одному из опытов.

4 График $\delta_{\text{отн}} = f(p)$.

5 Выводы (дать оценку точности испытываемого манометра; объяснить, как изменяется величина относительной погрешности с ростом показания манометра).

Контрольные вопросы

1 Действию каких внешних сил может быть подвергнута покоящаяся жидкость?

2 Что такое гидростатическое давление?

- 3 В каких единицах измеряется давление?
4 Как определяется гидростатическое давление в любой точке жидкости?
5 Что такое абсолютное и избыточное давление?
6 Какие приборы применяются для измерения давления? Какое давление они показывают?

Рекомендуемая литература: [1, с. 7–12; 2, с. 15–24; 3, с. 18–36].

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Цель работы:

- визуальное наблюдение устойчивых режимов движения воды в стеклянной трубе;
- экспериментальное определение чисел Рейнольдса, соответствующих наблюдаемым режимам движения;
- приобретение навыков экспериментального определения расхода (объемным способом) и средней скорости движения воды.

Краткие сведения из теории

В природе существуют два принципиально различных режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный.

При ламинарном режиме жидкость движется отдельными струйками или слоями и траектории отдельных частиц не пересекаются. При турбулентном режиме струйность потока нарушается, и частицы жидкости движутся по сложным траекториям, пересекаясь между собой.

Опыты Рейнольдса, а также исследования других ученых показали, что основным критерием для определения режима движения жидкости служит безразмерный параметр Re (*число Рейнольдса*). Для труб круглого сечения

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (2.1)$$

где v – средняя скорость движения жидкости в трубе;

d – диаметр трубы;

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Число Рейнольдса, при котором ламинарный режим движения переходит в турбулентный, называется *критическим*, а скорость движения жидкости, соответствующая этому числу, называется критической. Существует нижнее критическое число Рейнольдса $Re_{кр.н}$ и верхнее $Re_{кр.в}$. Если число Рейнольдса меньше нижнего критического числа, то режим движения жидкости *ламинарный*. При числе Рейнольдса, больше верхнего

критического числа, режим движения всегда **турбулентный**. В зоне между нижним и верхним критическими числами Рейнольдса режим движения может быть и ламинарным, и турбулентным. Это так называемая **переходная зона**. Но так как ламинарный режим движения в этой зоне очень неустойчив и легко переходит в турбулентный, то режим движения здесь обычно считается турбулентным. Поэтому для определения режима движения жидкости достаточно сравнить число Рейнольдса, соответствующее данному режиму движения, с нижним критическим числом.

Как показывают опыты, для труб круглого сечения $Re_{кр.н} = 2320$, $Re_{кр.в} = 4000$, и, следовательно, переходная зона находится при $Re = 2320 \dots 4000$.

Описание экспериментальной установки

Установка для наблюдения за режимами движения воды (рисунок 2.1) состоит из открытого напорного бака 1, к которому присоединена стеклянная труба 3, предназначенная для визуального наблюдения режимов движения воды, $d = 36$ мм. Вода в напорный бак подается по трубе 2, снабженной вентилем 4. Для поддержания в нем постоянного уровня предусмотрена сливная труба 5.

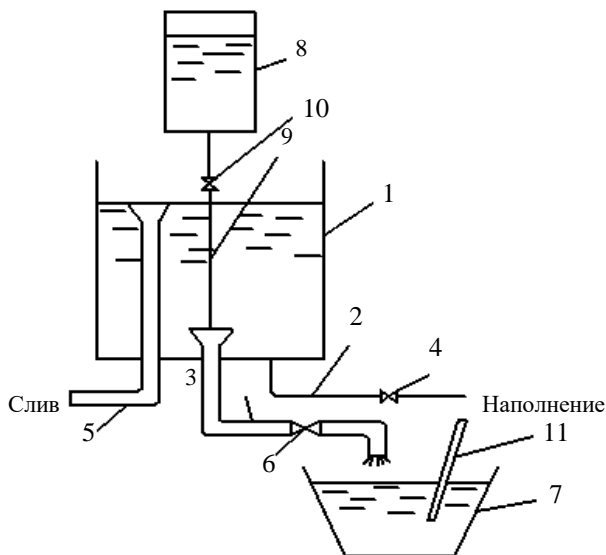


Рисунок 2.1 – Схема установки для определения режимов движения жидкости

Расход воды через стеклянную трубу регулируется вентилем 6.

Мерная емкость 7 подставляется в момент измерения расхода воды. Для определения расхода измеряется время наполнения мерной емкости до заданного уровня.

В верхней части бака установлена емкость 8 с подкрашенной жидкостью, которая по резиновому шлангу 9 подводится по оси стеклянной трубы. Расход подкрашенной жидкости регулируется краном 10.

Температура воды измеряется термометром 11.

Порядок проведения опытов

1 Подготовить таблицу для записи опытных и расчетных данных.

2 Открыть вентиль 4 (см. рисунок 2.1) и пополнить бак водой, следя за тем, чтобы уровень воды в нем сохранялся постоянным.

3 Приоткрыть вентиль 6 и установить сначала небольшую скорость воды в трубе 3.

4 Открыть кран 10 и отрегулировать поступление подкрашенной жидкости. Последняя должна вытекать в виде тонкой струйки.

5 Объемным способом определить расход воды. Для этого нужно подставить мерную емкость 7 под вытекающую струю и с помощью секундомера определить время заполнения ее до заданного уровня.

6 Термометром 11 измерить температуру воды.

7 Медленно открывая вентиль 6, установить несколько больший расход воды, и все измерения повторить. Произвести два опыта при ламинарном режиме.

8 Продолжая увеличивать расход воды, провести еще два опыта: один – при переходном режиме, признаком наступления которого является возникновение колебательного характера движения струйки подкрашенной жидкости с появлением местных размывов, другой – при турбулентном, когда струйка подкрашенной жидкости полностью разлита и вода в трубке равномерно окрашена.

Обработка экспериментальных данных

1 Определить расход воды объемным способом:

$$Q = \frac{W}{T}, \quad (2.2)$$

где W – заполняемый объем мерной емкости, см^3 ;

T – продолжительность заполнения объема W в мерной емкости, с.

2 Вычислить среднюю скорость движения воды в стеклянной трубе:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \quad (2.3)$$

где ω – площадь живого сечения трубы, $\omega = 10,2 \text{ см}^2$.

3 По замеренной температуре воды определить коэффициент кинематической вязкости, пользуясь формулой М.Н. Писарика

$$\nu = \frac{0,345}{(t+13,8)}, \quad (2.4)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, $\text{см}^2/\text{с}$;
 t – температура воды, $^{\circ}\text{C}$.

4 Вычислить число Рейнольдса по формуле (2.1).

5 Опытные данные и результаты расчетов свести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Опытные данные и результаты расчетов

Номер опыта	Опытные данные			Расчетные данные				
	$W, \text{см}^3$	$T, \text{с}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$Q, \text{см}^3/\text{с}$	$v, \text{см}/\text{с}$	$\nu, \text{см}^2/\text{с}$	Re	Режим движения

Содержание отчета

- 1 Принципиальная схема установки.
- 2 Таблица с опытными и расчетными данными.
- 3 Расчеты по одному из опытов.
- 4 Выводы (привести описание характера движения струйки подкрашенной жидкости при различных числах Рейнольдса, указать, между какими числами Рейнольдса наступает смена режимов движения с ламинарного на турбулентный, и сравнить с критическим числом Рейнольдса).

Контрольные вопросы

- 1 Какие существуют режимы движения жидкости, в чем их принципиальное различие?
 - 2 Какой параметр определяет режим движения жидкости?
 - 3 Что такое критическое число Рейнольдса?
 - 4 Показать, что число Рейнольдса безразмерно.
 - 5 Какой режим движения жидкости называется неустойчивым или переходным?
- Рекомендуемая литература:* [1, с. 37–38; 2, с. 62–65; 3, с. 103–105].

Лабораторная работа № 3

ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы:

- выполнить опытную проверку уравнения Бернулли;
- получить наглядное представление о форме напорной пьезометрической линии;
- приобрести навыки экспериментального определения расхода жидкости, гидродинамических давлений, а также пьезометрического, скоростного и полного напоров.

Краткие сведения из теории

Уравнение Бернулли (основное уравнение гидродинамики) устанавливает связь между скоростью движения, давлением и геометрическим положением сечений струйки (потока).

Для элементарной струйки идеальной жидкости оно имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}, \quad (3.1)$$

где v – скорость в некотором сечении элементарной струйки или для двух сечений элементарной струйки (1–1 и 2–2).

Выясним геометрический смысл уравнения Бернулли. Для этого обратим внимание на то, что все его члены имеют линейную размерность и поэтому могут рассматриваться как соответствующие высоты, которым присвоены следующие названия:

z – геометрическая высота;

$p / (\rho g)$ – пьезометрическая высота;

$v^2 / (2g)$ – скоростная высота (скоростной напор).

Сумма этих высот

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H$$

называется **полным гидродинамическим напором**.

Для идеальной движущейся жидкости сумма трех высот (напоров): геометрической, пьезометрической и скоростной – величина постоянная вдоль струйки:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{const (вдоль струйки)}. \quad (3.2)$$

Изменение высот z , $p / (\rho g)$, $v^2 / (2g)$ в направлении движения для струйки идеальной жидкости с осью А–Б относительно произвольной плоскости 0–0, называемой **плоскостью сравнения**, показано на рисунке 3.1.

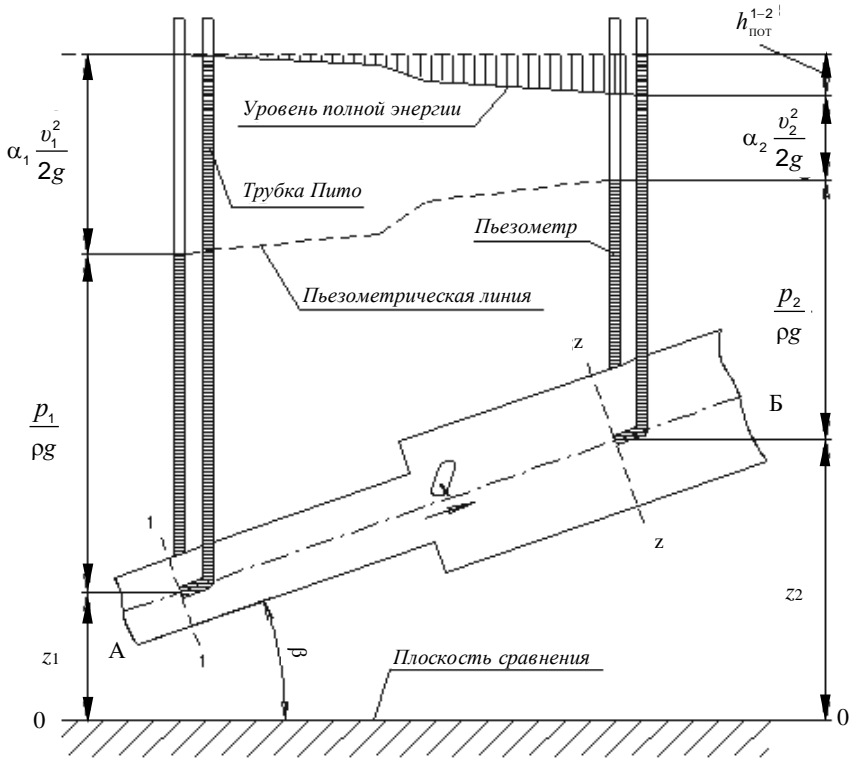


Рисунок 3.1 – Графическая иллюстрация геометрического смысла уравнения Бернулли

Плоскость, проходящая через вершины отрезков, равных H , называется **напорной плоскостью**, а линия, соединяющая вершины этих же отрезков, – **напорной** или **силовой линией**.

Для идеальной жидкости $H = \text{const}$, поэтому напорная плоскость 0–0 горизонтальна.

Уравнение Бернулли можно также рассматривать и с энергетической (физической) точки зрения. В этом случае каждый из его членов

представляет тот или иной вид удельной механической энергии, под которой понимают энергию, отнесенную к единице веса:

z – удельная потенциальная энергия положения;

$p / (\rho g)$ – удельная потенциальная энергия давления;

$z + p / (\rho g)$ – общий запас удельной потенциальной энергии;

$v^2 / (2g)$ – удельная кинетическая энергия.

Удельная энергия также имеет линейную размерность.

Для идеальной жидкости сумма трех удельных энергий (полный напор) по длине элементарной струйки постоянна.

Для двух сечений потока реальной жидкости уравнение Бернулли записывается в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2^2}{2g} + \sum h, \quad (3.3)$$

где v – средняя по расходу скорость;

α – коэффициент Кориолиса, равный отношению действительной кинетической энергии потока в данном сечении к кинетической энергии, вычисленной по средней скорости;

$\sum h$ – суммарная потеря энергии между сечениями 1–1 и 2–2.

При движении реальной жидкости гидродинамический напор в каждом последующем сечении (H_2) меньше, чем в предыдущем (H_1), на величину потерь напора $\sum h$, т.е. $H_1 - H_2 = \sum h$. Следовательно, напорная линия 0'–0' всегда наклонна. Падение ее на единицу длины называется **гидравлическим уклоном** i ,

$$i = \frac{(H_1 - H_2)}{l} = \frac{\sum h}{l}, \quad (3.4)$$

где l – расстояние между сечениями 1–1 и 2–2.

Линия p – p , соединяющая вершины вертикальных отрезков, равных сумме $p / (\rho g) + z$, называется **пьезометрической линией**, а падение ее на единицу длины – **пьезометрическим уклоном** i_p ,

$$i_p = \left[\left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) - \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) \right] / l. \quad (3.5)$$

Пьезометрическая линия может понижаться (при увеличении скорости в направлении движения) или повышаться (при уменьшении скорости). Поэтому пьезометрический уклон может быть положительным или

отрицательным. При равномерном движении жидкости гидравлический уклон равен пьезометрическому.

На практике пользуются тремя видами записи удельной механической энергии, относя энергию к единице веса, массы и объема.

Энергия, отнесенная к единице веса, Дж/Н или м,

$$\frac{dE}{dG} = H. \quad (3.6)$$

Энергия, отнесенная к единице массы, Дж/кг,

$$\frac{dE}{dm} = gH. \quad (3.7)$$

Энергия, отнесенная к единице объема, Дж/м³ или Н/м²,

$$\frac{dE}{dW} = \rho gH = P, \quad (3.8)$$

где P – полное гидродинамическое давление.

Уравнение Бернулли положено в основу водомера (расходомера) Вентури 2 (рисунок 3.2), используемого для измерения расхода воды в водопроводе. Водомер Вентури 2 представляет собой устройство, осуществляющее сужение потока – **дросселирование**. Водомер состоит из двух участков: плавно сужающегося (**сопла**) и постепенно расширяющегося (**диффузора**). Скорость потока в суженном месте возрастает, а давление падает. Возникает разность (перепад) давлений, которая измеряется двумя пьезометрами 5 и 6.

Объемный расход воды

$$Q = C\sqrt{\Delta H}, \quad (3.9)$$

где C – величина постоянная для данного водомера;

ΔH – разность показаний пьезометров 5 и 6, см,

$$\Delta H = \frac{P_5}{\rho g} - \frac{P_6}{\rho g}. \quad (3.10)$$

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рисунок 3.2) представляет собой трубопровод переменного сечения, на характерных участках которого, т.е. при переходе труб от одного диаметра к другому и на повороте, установлены пьезометры.

Все пьезометры размещены на специальных штативах (номера пьезометров на схеме в кружках).

Нуль шкалы пьезометров совпадает с осью трубопровода, которая находится в плоскости сравнения ($z = 0$).

Движение воды по трубопроводу осуществляется за счет напора, создаваемого водонапорным баком, уровень воды в котором поддерживается постоянным (на рисунке 3.2 не показан).

Расход воды регулируется вентилем 1. Для измерения расхода воды жидкость сбрасывается в емкость 3 с последующим замером высоты излива h . Время заполнения емкости измеряется секундомером. Объем воды в емкости определяется весовым способом. Емкость взвешивается на весах и определяется масса воды, находящаяся в ней (массу емкости при этом необходимо вычесть из полученной общей массы). Так как плотность воды равна 1000 кг/м^3 , то $m = W$.

Внутренние диаметры и площади живых сечений труб в местах подключения пьезометров составляют:

- а) 1, 4–5, 7–11 – $d = 36 \text{ мм}$, $\omega = 10,2 \text{ см}^2$;
- б) 2–3 – $d = 56 \text{ мм}$, $\omega = 24,6 \text{ см}^2$;
- в) 6 – $d = 17 \text{ мм}$, $\omega = 2,27 \text{ см}^2$.

Номера пьезометров и расстояние между ними, место расположения фланцев приведены на рисунке 3.2

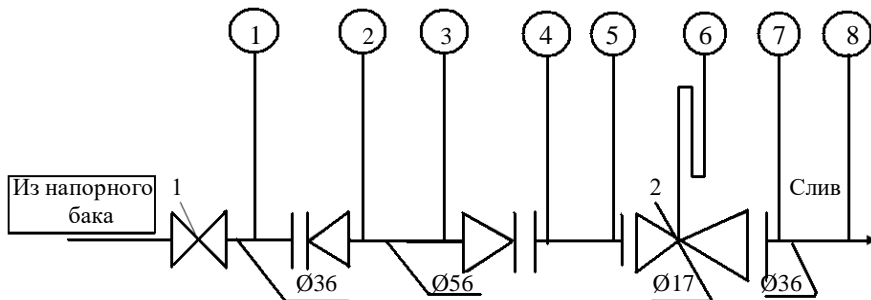


Рисунок 3.2 – Схема установки для проверки уравнения Бернулли

Порядок проведения опытов

- 1 Подготовить таблицу для записи опытных и расчетных данных.
- 2 Заполнить водой водонапорный бак (производится лаборантом).
- 3 Удалить из пьезометров воздух. Для этого открыть вентиль 1 и, периодически изменяя степень его открытия, добиться прекращения

подъема пузырьков воздуха через пьезометры. После заполнения пьезометров водой установить некоторый постоянный расход.

4 Снять показания пьезометров, установленных на трубопроводе.

5 Определить 3 раза время заполнения емкости для сбора воды. Найти объем воды в емкости для каждого опыта.

6 Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Опытные данные и результаты расчетов

Номер сечения	Опытные данные					Расчетные данные			
	d , мм	ω , см ²	$p/(pg)$, см	W , см ³	T , с	Q , см ³ /с	v , см/с	$v^2/2g$	H
								см	

Обработка экспериментальных данных

1 Определить средний из трех измерений объемный расход воды по формуле (2.2).

2 Вычислить среднюю скорость движения воды по участкам трубопровода по формуле (2.3).

3 Вычислить скоростной напор $v^2/2g$ на каждом из участков (принято $\alpha = 1$).

4 Определить полный напор в каждом из сечений трубопровода по формуле

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}. \quad (3.11)$$

5 Опытные данные и результаты расчета свести в таблицу 3.1.

6 Найти постоянную расходомера Вентури по формулам (3.9) и (3.10).

7 Произвести анализ изменений удельной механической энергии на участках трубопровода 1–2, 3–4, 5–6, 1–11, для чего составить таблицу 3.2.

8 По данным таблицы 3.1 построить пьезометрическую и напорную линии. Для этого на оси абсцисс в определенном масштабе отложить расстояние между пьезометрами и расположение фланцев, а по оси ординат – последовательно пьезометрическую высоту и, добавляя к ней скоростную высоту, – величину полного напора.

9 Пьезометрические и напорные линии следует проводить, соединяя точки по линейке. В местах резкого изменения живого сечения трубы (между пьезометрами 1–2 и 3–4) пьезометрический и полный напоры изменяются скачкообразно. В водомере Вентури 2 между фланцами полный напор изменяется плавно.

Таблица 3.2 – Определение удельной механической энергии на участках трубопровода

Участки трубопровода	Изменение удельной механической энергии, м (Дж/Н)		Потеря механической энергии, увеличение тепловой энергии Σh (+), м (Дж/м)
	удельная потенциальная энергия давления $p/\rho g$ (+ или –)	удельная кинетическая энергия $v^2/2g$ (+ или –)	

Содержание отчета

- 1 Схема установки.
- 2 Таблицы 3.1 и 3.2 с опытными и расчетными данными.
- 3 Расчет всех величин для одного из сечений.
- 4 Пьезометрическая и напорная линии.
- 5 Выводы (объяснить характер изменения пьезометрической и напорной линий на отдельных участках трубопровода и сопоставить полученные данные с теорией, подчеркнуть наглядность демонстрации уравнения Бернулли для доказательства закона сохранения энергии).

Контрольные вопросы

- 1 Каков геометрический и физический смысл уравнения Бернулли?
- 2 Что такое напорная и пьезометрическая линии?
- 3 Что называется гидравлическим и пьезометрическим уклоном?
- 4 В чем заключается смысл коэффициента Кориолиса?

Рекомендуемая литература: [1, с. 29–34; 2, с. 37–78; 3, с. 73–80].

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ ВОДОПРОВОДА

Цель работы:

- экспериментальное определение потери напора по длине при установившемся равномерном турбулентном движении воды в круглоцилиндрической трубе;
- выяснение областей сопротивления, к которым относятся проведенные опыты;
- экспериментальное определение коэффициентов гидравлического трения и сопоставление их с коэффициентами, найденными в результате расчета по рекомендуемым формулам.

Краткие сведения из теории

При движении реальной жидкости вследствие затраты энергии на преодоление сил трения (внутренних и внешних) происходят потери напора (потери удельной энергии, или гидравлические потери).

Различают два вида потерь напора: по длине и местные.

Потеря напора по длине при равномерном установившемся движении жидкости в трубах определяется по формуле *Дарси-Вейсбаха*

$$h_1 = \left(\frac{l}{d}\right) \left(\frac{v^2}{2g}\right), \quad (4.1)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, или коэффициент Дарси;

l – длина трубопровода, см;

d – диаметр трубопровода, см;

v – средняя скорость движения жидкости, см/с.

Коэффициент λ при ламинарном режиме движения ($Re < 2320$) зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле *Стокса*

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (4.2)$$

При турбулентном режиме движения ($Re > 2320$) коэффициент λ зависит в общем случае от числа Рейнольдса и относительной шероховатости Δ_3/d :

$$\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta_3}{d}\right), \quad (4.3)$$

где Δ_3 – эквивалентная шероховатость, под которой понимают такую среднюю высоту выступов шероховатости, которая дает такое же сопротивление, как и действительная неравномерная шероховатость.

При турбулентном движении жидкости различают три области (режима) сопротивления: гладкого, доквадратичного и квадратичного. Коэффициент для каждой из областей сопротивления определяется по специальным формулам.

Границы областей (режимов) сопротивления при турбулентном движении жидкости в шероховатых трубах устанавливают путем сравнения числового значения отношения Δ_3/d с числом Re .

Первая область, соответствующая малым значениям Re и Δ_3/d , – *область гидравлических гладких труб*. Имеет место при $Re \Delta_3/d < 20$, $\lambda = f(Re)$.

Вторая область – *область шероховатых труб* (доквадратичная, или переходная область). Имеет место при $20 < Re \Delta_3/d < 500$, $\lambda = f(Re, \Delta_3/d)$.

Третья область, соответствующая большим значениям Re и Δ_3/d , – **область вполне шероховатых труб** (квадратическая, или автомодельная область). Имеет место при $Re \Delta_3/d > 500$, $\lambda = f(\Delta_3/d)$.

Для определения коэффициента λ при турбулентном движении жидкости предложен ряд обобщенных формул, действительных для всех режимов сопротивления, например формула **Кольбука**. Для практических расчетов можно рекомендовать универсальную формулу **А. Л. Альтиуля**

$$\lambda = 0,114 \sqrt[4]{\frac{\Delta_3}{d}} + \frac{68}{Re}. \quad (4.4)$$

Для области гидравлических гладких труб $\left(\text{при } Re \leq 20 \frac{d}{\Delta_3} \right)$ она принимает более простой вид и переходит в известную формулу **Блазиуса**

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (4.5)$$

Для области квадратичного сопротивления (автомодельности) при $Re(\Delta_3/d) > 500$ формула (4.4) приводится к формуле **Шифринсона**

$$\lambda = 0,114 \sqrt[4]{\frac{\Delta_3}{d}}. \quad (4.6)$$

Расчет водопроводных труб (стальных и чугунных), бывших в эксплуатации, обычно проводят по формулам Ф.А. Шевелева (СНиП 2.04.01-85) при $v > 1,2$ м/с (в области квадратического сопротивления):

$$\lambda = \frac{0,21}{d^{0,3}}. \quad (4.7)$$

При $v < 1,2$ (в переходной области) значение λ , полученное по формуле (4.7), надо умножить на поправочный коэффициент K_n (принимается по таблице 4.1).

Таблица 4.1 – Значения коэффициента K_n в зависимости от скорости

v , м/с	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
K_n	1,28	1,2	1,15	1,115	1,085	1,06	1,04	1,08	1,015

Описание экспериментальной установки

Установка для определения коэффициента Дарси представляет собой часть установки для опытной проверки уравнения Бернулли, которая на участке 10–11 имеет постоянное сечение ($d = 36$ мм) длиной $l = 400$ см. Эта схема участка показана на рисунке 4.1.

Для измерения расхода воды используется расходомер Вентури 2.

Температура воды измеряется с помощью термометра.

Потеря напора по длине определяется по разности показаний пьезометров 10 и 11.

Можно воспользоваться также весовым способом (см. лабораторную работу № 3).

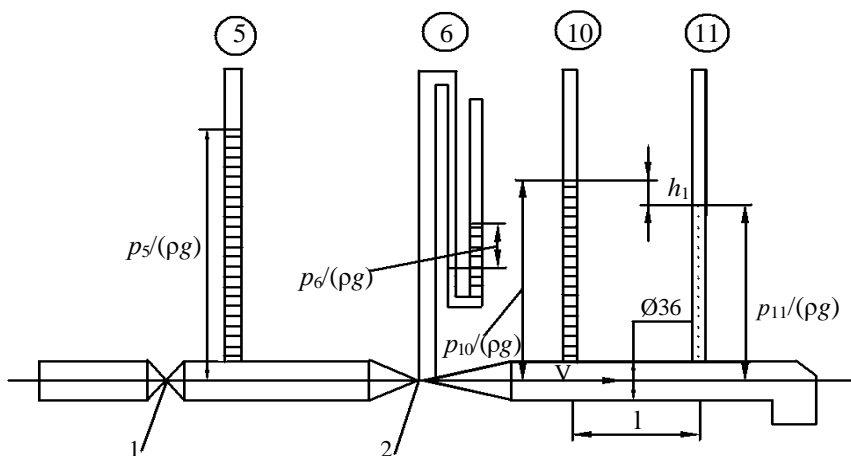


Рисунок 4.1 – Схема установки для определения коэффициента Дарси

Порядок проведения опытов

1 Подготовить таблицу (таблица 4.2) для записи опытных и расчетных данных.

2 Подготовить установку к работе (см. лабораторную работу № 3).

3 Изменяя расход воды Q , проделать не менее 6 опытов, и в каждом из них произвести замеры:

- показаний пьезометров в сечениях 10 и 11;
- расхода воды с помощью водомера Вентури, для чего записать показания пьезометров 5, 6;
- температуры воды.

Обработка экспериментальных данных

1 Вычислить объемный расход воды по формулам (3.9) и (3.10). Значение постоянной водомера Вентури "С" взять из отчета по лабораторной работе № 3 (можно принять $C = 89 \text{ см}^3/\text{с} \cdot \text{см}^{0,5}$).

2 Определить скорость движения воды по формуле (2.3), приняв $\omega = 10,2 \text{ см}^2$.

3 Найти потери напора по длине по формуле

$$h_1 = \frac{P_{10}}{\rho g} - \frac{P_{11}}{\rho g}. \quad (4.8)$$

4 По замеренной температуре воды определить коэффициент кинематической вязкости, пользуясь формулой (2.4).

5 Вычислить число Рейнольдса по формуле (2.1).

6 Определить значение коэффициента λ по формуле

$$\lambda = \left(2g \frac{d}{l} \right) \left(\frac{h_1}{v^2} \right). \quad (4.9)$$

Принять $d = 3,6 \text{ см}$; $l = 400 \text{ см}$.

7 Найти значение λ по формулам Альтшуля (4.4). Значение эквивалентной шероховатости Δ_s принять равным 3,2–3,5 мм.

8 Найти значение λ по формуле Шевелева (4.7).

9 Найти эквивалентную шероховатость по формуле

$$\Delta_s = \left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^4 d. \quad (4.10)$$

10 Опытные данные и результаты расчетов свести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Опытные данные и результаты расчетов

Номер опыта	Опытные данные					Расчетные данные								
	$P_{10}/(\rho g)$, см	$P_{11}/(\rho g)$, см	$P_2/(\rho g)$, см	$P_6/(\rho g)$, см	t , °C	Δh , см	Q , см ³ /с	v , см/с	h_i , см	v , см ² /с	Re	Значение λ		
												опытное	по формуле Альтшуля	по формуле Шевелева

11 Установить режимы сопротивления, имевшие место при проведении опытов.

12 Определить эквивалентную шероховатость трубы, используя формулу (4.10) и значение коэффициента λ в квадратичной области сопротивления.

Содержание отчета

- 1 Схема установки.
- 2 Таблица с опытными и расчетными данными.
- 3 Расчеты всех величин для одного из опытов.
- 4 График $\lambda = f(\text{Re})$.
- 5 Выводы (сопоставить опытные данные с вычисленными по эмпирическим формулам, а при наличии расхождений объяснить возможную причину).

Контрольные вопросы

- 1 От каких параметров зависит коэффициент гидравлического трения по длине в общем случае?
- 2 Назовите области гидравлического сопротивления и укажите, от каких параметров зависит коэффициент λ в каждой из этих областей?
- 3 Дайте определение понятий "эквивалентная шероховатость", "относительная шероховатость".
- 4 Какие трубы считаются гидравлически гладкими? шероховатыми?

Рекомендуемая литература: [1, с. 36–44; 2, с. 69–93].

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ В ТРУБАХ

Цель работы:

- ознакомиться с методикой экспериментального определения коэффициента местных сопротивлений;
- экспериментальное определение потерь напора и коэффициента местных сопротивлений в случаях, когда поток воды в напорном трубопроводе на своем пути встречает резкое расширение и резкое сужение трубы, плавный поворот трубы на 180° .

Краткие сведения из теории

Местные потери энергии, в отличие от потерь по длине, связаны с резким изменением размеров или конфигурации потока на коротком расстоянии и создаются различного рода местными сопротивлениями (колена, тройники, сужения, расширения, задвижки, краны, клапаны, диффузоры, конфузоры и т. п.).

При протекании жидкости через местные сопротивления происходит образование водоворотных зон с интенсивным обменом частицами жидкости между основными потоками и этими зонами, что и является основной причиной возникновения местных потерь энергии.

Потери энергии в местных сопротивлениях определяются по формуле **Вейсбаха**

$$h_{\text{м}} = \frac{\zeta v^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления;

v – средняя скорость в трубе (если скорость изменяется по длине, удобнее принимать бóльшую из скоростей).

Согласно опытным данным местные потери энергии (напора) подчиняются закону независимости действия сил. Поэтому местные потери напора трубопровода (системы), содержащего несколько местных сопротивлений, могут быть определены как сумма потерь напора отдельных сопротивлений, т. е. $h_{\text{м.сист}} = \sum h_{\text{м.и}}$. Однако этот метод применим только в том случае, если расстояния между местными сопротивлениями составляют не менее 40–50 диаметров трубопровода.

Значения коэффициентов местных сопротивлений определяются, как правило, опытным путем. И лишь в немногих случаях, например при внезапном расширении, могут быть подсчитаны по теоретическим формулам.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при ламинарном движении жидкости значение ζ зависит от вида местного сопротивления и числа Re .

Общая формула для определения ζ , применяемая при ламинарном и турбулентном режимах,

$$\zeta = \frac{A}{Re} + \zeta_{\text{кв}}, \quad (5.2)$$

где A – коэффициент, зависящий от вида местного сопротивления;

$\zeta_{\text{кв}}$ – коэффициент, соответствующий квадратичной зоне сопротивления.

При турбулентном движении жидкости значение ζ зависит только от вида местного сопротивления.

Описание экспериментальной установки

Коэффициенты местных сопротивлений определяются на установке для опытной проверки уравнения Бернулли в той ее части, которая содержит местные сопротивления (рисунок 5.1).

Расход воды регулируется с помощью вентиля 1, установленного в начале трубопровода, и измеряется с помощью расходомера Вентури 2.

Пьезометрические высоты определяются по показаниям пьезометров, установленных перед и за каждым сопротивлением: резкое расширение (1–2), резкое сужение (3–4), плавный поворот трубы на 180° (8–9) при радиусе кривизны $R=185$ мм.

Порядок проведения опытов

1 Подготовить таблицу (таблица 5.1) для записи опытных и расчетных данных.

2 Подготовить установку к работе (см. лаб. работу № 3).

3 Снять отсчеты по пьезометрам перед каждым сопротивлением и за ним (1 и 2, 3 и 4, 8 и 9).

4 Измерить расход воды с помощью расходомера Вентури, для чего снять показания пьезометров 5 и 6.

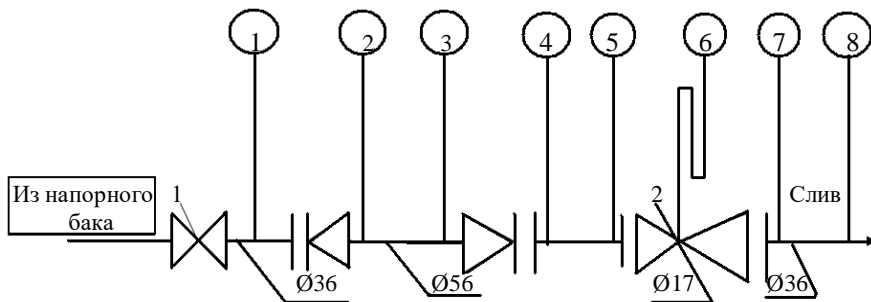


Рисунок 5.1 – Схема установки для определения коэффициентов местных сопротивлений

Обработка экспериментальных данных

1 Определить средний из трех замеров объемный расход воды по формуле (2.2).

2 Вычислить скорость движения воды перед сопротивлением и за ним соответственно:

$$v_i = \frac{Q}{\omega_1}; \quad v_{i+1} = \frac{Q}{\omega_{i+1}}. \quad (5.3)$$

3 Найти значение скоростных напоров: $v_i^2 / (2g)$ – перед сопротивлением и $v_{i+1}^2 / (2g)$ – за сопротивлением.

4 Рассчитать значения полных напоров перед и за сопротивлением:

$$H_i = \frac{p_i}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}; \quad H_{i+1} = \frac{p_{i+1}}{\rho g} + \frac{v_{i+1}^2}{2g} \quad (5.4)$$

5 Вычислить потерю энергии в местных сопротивлениях:

$$h_m = H_i - H_{i+1}. \quad (5.5)$$

6 Найти коэффициенты местных сопротивлений:

$$\zeta = \frac{h_m \cdot 2g}{v^2}. \quad (5.6)$$

7 Определить коэффициенты местных сопротивлений, пользуясь эмпирическими формулами, приводимыми в справочниках.

Для внезапного расширения русла ζ определяют по формуле **Борда**

$$\zeta_p = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_{i+1}}\right)^2. \quad (5.7)$$

Для внезапного сужения русла ζ можно определить по формуле **Идельчика**

$$\zeta_c = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i}\right)^2. \quad (5.8)$$

Для отвода (постепенный поворот трубы) круглого сечения с углом 90° и $R/d \geq 1$ при турбулентном течении можно пользоваться эмпирической формулой

$$\zeta_{\text{отв}} = 0,051 + 0,19 \frac{d}{R}, \quad (5.9)$$

где d – диаметр трубы;

R – радиус кривизны отвода.

Для плавного поворота трубы на 180° значение, полученное по формуле (5.9), надо удвоить.

Коэффициент $\zeta_{\text{отв}}$ учитывает лишь дополнительные сопротивления, обусловленные кривизной русла, и не содержит потери на трение по длине трубы.

8 Значение площадей живых сечений для исследуемых сопротивлений можно взять из лабораторной работы № 3.

9 Данные опытов и вычислений свести в таблицу 5.1.

Содержание отчета

- 1 Схемы истечения жидкости при резком расширении и сужении трубы.
- 2 Таблица с опытными и расчетными данными.

3 Расчеты всех величин, входящих в таблицу, для одного из местных сопротивлений, а значения коэффициентов ζ – по эмпирическим формулам для всех местных сопротивлений.

4 Выводы (сравнить опытные и справочные значения ζ , объяснить возможные причины расхождения между ними).

Таблица 5.1 – Опытные данные и результаты расчетов

Вид сопротивлений	Опытные данные						Расчетные данные						Значение ζ			
	p_i (рр), см	p_{i+1} /(рр), см	p_5 /(рр), см	p_6 /(рр), см	ω_i , см ²	ω_{i+1} , см ²	Q , см ³ /с	v_i , см/с	v_{i+1} , см/с	v_i^2 /(2g), см	v_{i+1}^2 /(2g), см	H_i , см	H_{i+1} , см	H_m , см	опытное	справочное

Контрольные вопросы

1 Какие параметры нужно знать для определения потери энергии в данном местном сопротивлении?

2 Как определяются местные потери энергии в трубопроводе, содержащем несколько местных сопротивлений?

3 Методы определения коэффициентов местных сопротивлений.

4 Как можно уменьшить потери энергии при резком изменении сечения трубопровода?

Рекомендуемая литература: [1, с. 44–48; 2, с. 93–105; 3, с. 120–250].

Лабораторная работа № 6

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

Цель работы:

– ознакомиться с методикой экспериментального определения коэффициентов расхода μ и скорости φ для отверстий и насадок;

– экспериментальное определение коэффициентов расхода, скорости и потерь при истечении воды через малое отверстие круглой формы в тонкой

стенке и насадки следующих типов: внешний цилиндрический, конический сходящийся и конический расходящийся;

– сравнить опытные значения указанных коэффициентов со справочными.

Краткие сведения из теории

Малым отверстием в тонкой стенке называется отверстие с острыми кромками, диаметр которого $d \leq 0,1 H$ (H – напор над центром тяжести отверстия), причем толщина стенки не влияет на форму и условие течения струи. В этом случае струя на расстоянии от внутренней стенки, равном приблизительно $(0,5-1,0)d$, образует сжатое сечение, имеющее наименьшую площадь и практически параллельно-струйное течение.

Степень сжатия струи оценивается по *коэффициенту сжатия*, под которым понимают отношение

$$\varepsilon = \omega_c / \omega, \quad (6.1)$$

где ω_c – площадь сжатого сечения струи;

ω – площадь отверстия.

Сжатие струи происходит вследствие взаимодействия центробежных сил, возникающих при переходе от различных направлений, в том числе и от радиального вдоль стойки к осевому.

Чтобы определить скорость истечения при постоянном напоре, составим уравнение Бернулли для сечений 0–0 (уровень свободной поверхности) и 1–1 (рисунок 6.1). Полагая распределение скоростей в струе равномерным, получим

$$\frac{p_0}{\rho g} + H = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + \frac{\zeta v^2}{2g}. \quad (6.2)$$

Отсюда $H = (1 + \zeta) v^2 / (2g)$.

Из последнего уравнения найдем

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (6.3)$$

где $\varphi = (\sqrt{1 + \zeta})^{-1}$ – коэффициент скорости.

Зная v , можно найти расход $Q = \omega_c v = \omega \varepsilon \varphi \sqrt{2gH}$.

Обозначив $\varepsilon \varphi = \mu$ – коэффициент расхода, получим окончательно

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (6.4)$$

Полученные формулы для ν и Q справедливы для истечения как через отверстия, так и через насадки, но со своими значениями μ и φ .

Описание экспериментальной установки

Установка для исследований истечения жидкости через отверстие в тонкой стенке и насадки показано на рисунке 6.1. Она имеет напорный бак 1 с устройством для закрепления сменных насадок 4, перекидной клапан 3 и мерную емкость 6.

Расход воды определяется путем заполнения мерной емкости 6 с одновременным измерением времени заполнения ее по секундомеру.

Для поддержания постоянного уровня воды в баке предусмотрена сливная труба 2. Бак наполняется через трубу 5.

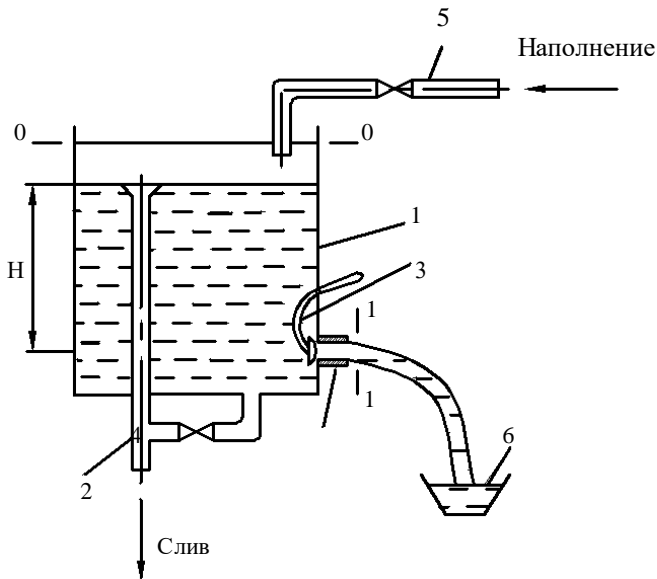


Рисунок 6.1 – Схема установки для исследования истечения воды через отверстие в тонкой стенке насадки

Порядок проведения опытов

- 1 Подготовить таблицу для записи опытных и расчетных данных.
- 2 Установить в гнезде для закрепления сменных насадков диск с отверстием в тонкой стенке и закрыть его перекидным клапаном.
- 3 Наполнить бак водой до уровня, при котором начинается сброс ее в сливную трубу 2, после чего повернуть перекидной клапан в сторону открытия и с помощью мерной емкости и секундомера измерить расход.
- 4 Действуя аналогичным образом, произвести испытания всех остальных насадков.

Обработка экспериментальных данных

- 1 Определить объемный расход воды по формуле (2.2) лабораторной работы № 2.
- 2 Вычислить скорость истечения идеальной жидкости по формуле

$$v = \sqrt{2gH} . \quad (6.5)$$

- 3 Вычислить расход при истечении идеальной жидкости (без учета сжатия для отверстия)

$$Q_{\text{и}} = v_{\text{и}}\omega. \quad (6.6)$$

Значения ω содержатся в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Опытные данные и результаты расчетов

Вид истечения	$d, \text{ см}$	$\omega, \text{ см}^2$	Опытные данные			Расчетные данные						Справочные данные				
			$W, \text{ см}^3$	$T, \text{ с}$	$H, \text{ см}$	$Q, \text{ см}^3/\text{с}$	$v_{\text{и}}, \text{ см}/\text{с}$	$Q_{\text{и}}, \text{ см}^3/\text{с}$	μ	φ	ζ	μ	φ	ζ	ε	
Круглое отверстие в тонкой стенке	1,02	0,82											0,62	0,97	0,06	0,64
Внешний цилиндрический насадок	0,99	0,79											0,82	0,82	0,50	0,64
Конический сходящийся насадок	1,14	1,02											0,94	0,96	0,08	0,98
Конический расходящийся насадок	1,45	1,62											0,50	0,50	3,00	1,00

4 Найти коэффициент расхода по формуле

$$\mu = \frac{Q}{Q_{и}}. \quad (6.7)$$

5 Определить значение коэффициентов φ и ζ соответственно по формулам

$$\varphi = \frac{\mu}{\varepsilon}; \quad \zeta = \varphi^{-2} - 1. \quad (6.8)$$

6 Значения коэффициента сжатия взять из таблицы 6.1.

7 Данные опытов и результаты расчетов свести в таблицу 6.1.

Содержание отчета

1 Вычертить схему установки.

2 Заполнить таблицу опытными и расчетными данными.

3 Привести расчеты всех величин для одного из видов истечения.

4 В выводах сравнить полученные опытные значения μ , φ и ζ со справочными. Объяснить, почему при истечении через насадки расход возрастает по сравнению с истечением через отверстие.

Контрольные вопросы

1 Какие отверстия принято называть малыми и почему?

2 Что следует понимать под отверстием в тонкой стенке, с совершенным сжатием и несовершенным, полными и неполным?

3 Область применения различных типов насадков.

4 Какой напор называется предельным при истечении через внешний цилиндрический насадок и чему равно его значение?

5 Почему при истечении через внешний цилиндрический насадок расход возрастает по сравнению с истечением через отверстие в тонкой стенке?

6 Почему при истечении через конический расходящийся насадок расход увеличивается по сравнению с остальными видами истечения?

Рекомендуемая литература: [1, с. 48–54; 2, с. 106–118; 3, с. 126–143].

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Цель работы:

- демонстрация гидравлического удара в водопроводе;
- экспериментальное определение величины повышения давления при ударе в случае мгновенного закрытия крана;
- вычисление повышения давления при ударе с помощью формулы Н.Е. Жуковского и сравнение вычисленного значения с полученными экспериментально.

Краткие сведения из теории

Гидравлическим ударом обычно называют резкое изменение давления, возникающее в напорном трубопроводе при внезапном изменении скорости потока жидкости. При этом происходит сжатие и расширение жидкости, расширение и сжатие трубы. Все эти изменения имеют характер затухающих колебаний, сопровождающихся чередующимися резким повышением и понижением давления.

Возникающие добавочные давления внутри трубопровода могут привести к разрыву стыковых соединений, арматуры, стенки трубопровода.

Скорость распространения упругих деформаций называется скоростью ударной волны c .

Время пробега прямой и обратной ударных волн составляет длительность фазы гидравлического удара, т. е.

$$T_{\phi} = \frac{2l}{c}, \quad (7.1)$$

где l – длина трубопровода;

c – скорость распространения ударной волны.

Период гидравлического удара равен двум фазам.

Впервые решение задачи о гидравлическом ударе было дано в 1898 г. профессором *Н.Е. Жуковским*. Повышение давления при гидравлическом ударе по Н.Е. Жуковскому

$$\Delta p = p - p_0 = \rho c (v_0 - v), \quad (7.2)$$

где p – давление в жидкости перед задвижкой в момент удара;

p_0 – давление в жидкости перед задвижкой до удара;

ρ – плотность жидкости;

v_0, v – средняя скорость течения жидкости в трубопроводе соответственно до и после удара.

Скорость распространения ударной волны

$$c = \frac{E_{\text{ж}}}{\sqrt{\rho \left(1 + \frac{d E_{\text{ж}}}{\delta E_{\text{тр}}} \right)}}, \quad (7.3)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода;

δ – толщина стенки трубы;

$E_{\text{ж}}, E_{\text{тр}}$ – модули упругости соответственно жидкости и материала стенок труб.

Скорость распространения ударной волны в воде

$$c = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{d}{\delta} \left(\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{тр}}} \right)}}, \quad (7.4)$$

где 1435 – скорость распространения звука в воде, м/с.

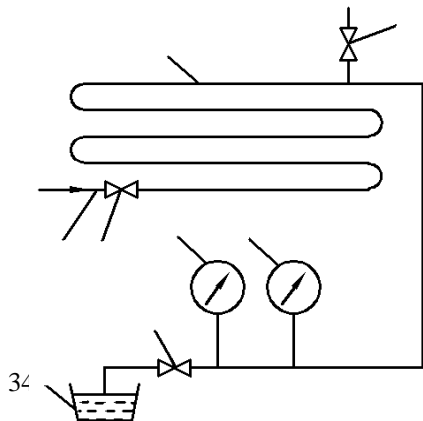
Для стали $E_{\text{тр}} = 2,12 \cdot 10^{11}$ Па; для воды $E_{\text{в}} = 2,1 \cdot 10^9$ Па, поэтому в формуле можно принять отношение $E_{\text{в}} / E_{\text{тр}} = 1 / 100$.

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из трубопровода 3, присоединенного к городскому водопроводу 1 с краном 2 для регулирования скорости течения воды в трубопроводе, манометров 6 и 7 с двумя стрелками для измерения давления в жидкости, крана 5 для мгновенного закрытия и штуцера 8 (рисунок 7.1).

Для измерения расхода служит мерная емкость 4.

Характеристика трубопровода: длина $l = 120$ м, внутренний диаметр $d = 28$ мм, толщина стенки $\delta = 4$ мм.



Порядок проведения опытов

8

1 Подготовить таблицу для записи опытных и расчетных данных.

2 Удалить из водопровода воздух при помощи штуцера 8.

3 При закрытом вентиле 5 определить по манометру 6 статическое давление p_0 .

4 Приоткрыть вентиль 2, обеспечив в водопроводе некоторый расход воды Q . Измерить расход воды с помощью мерной емкости и секундомера.

5 Мгновенно перекрыть кран 5 на напорном трубопроводе и наблюдать изменение давления по манометру 7.

6 Определить по манометру 7 с помощью фиксирующей стрелки давление в момент удара p .

7 Выполнить 4–5 опытов, изменяя в каждом расход воды.

8 Результаты измерений записать в таблицу 7.1.

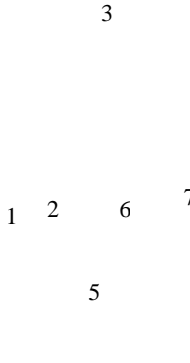


Рисунок 7.1 – Схема установки для изучения гидравлического удара в трубопроводе

Обработка экспериментальных данных

1 Определить расход жидкости по формуле (2.2).

2 Вычислить среднюю скорость в трубопроводе по формуле (2.3), приняв внутренний диаметр труб $d = 28$ мм и $\omega = 6,16$ см².

3 Определить скорость распространения ударной волны по формуле (7.4). Принять $d = 28$ мм, $\delta = 4$ мм.

4 Вычислить повышение давления при ударе

$$\Delta p = p - p_0. \quad (7.5)$$

5 Вычислить повышение давления Δp при ударе по формуле (7.2) Н.Е. Жуковского при $v = 0$.

6 Вычислить по формуле (7.1) длительность фазы удара.

7 Опытные данные и результаты расчетов свести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Опытные данные и результаты расчетов

№ м.ср. опыт	Опытные данные	Расчетные данные
--------------------	----------------	------------------

	$W, \text{ м}^3$	$T, \text{ с}$	$\rho_0, \text{ кгс/см}^2$	$P, \text{ кгс/см}^2$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$v_0, \text{ м/с}$	$c, \text{ м/с}$	$\Delta p_{\text{от}}, \text{ МПа}$	$\Delta p, \text{ МПа}$	$T_{\text{ф}}$	K

Содержание отчета

- 1 Вычертить схему установки.
- 2 Заполнить таблицу опытными и расчетными данными.
- 3 Привести расчеты всех величин для одного из опытов.
- 4 Построить график зависимости $\Delta p = f(v_0)$.
- 5 В выводах дать заключение о соответствии опытных и расчетных данных. При наличии расхождений объяснить возможную причину.

Контрольные вопросы

- 1 От каких параметров зависит повышение давления в трубопроводе при прямом ударе?
- 2 Влияет ли на величину Δp режим движения жидкости?
- 3 Каково влияние толщины трубы на величину Δp при прямом ударе?
- 4 Меры по уменьшению величины гидравлического удара.
- 5 Где c будет самой большой – в чугунных, медных, стальных трубах?

Рекомендуемая литература: [1, с. 64–66; 2, с. 140–147; 3, с. 159–166].

Лабораторная работа № 8

ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Цель работы:

- ознакомиться с устройством, принципом действия центробежного насоса и основными элементами насосной установки и их назначением;
- приобрести навыки в определении основных показателей работы насоса: подачи, напора, полезной и потребляемой мощности и коэффициента полезного действия (КПД);
- построить комплексную характеристику насоса.

Краткие сведения из теории

Насосы – это гидравлические машины, предназначенные для перемещения жидкости и сообщения ей механической энергии. Насосы самых различных конструкций широко применяются во всех отраслях народного хозяйства, в том числе и в системах водоснабжения и

канализации. Наиболее распространены центробежные насосы из-за простоты конструкции и удобства эксплуатации.

Основными конструктивными элементами центробежного насоса являются рабочее колесо с изогнутыми лопатками и корпус спиральной формы.

При вращении рабочего колеса жидкость, находящаяся в насосе, увлекается лопатками, под действием центробежной силы движется вдоль лопаток от центра колеса к периферии и через спиральный отвод подается в нагнетательный трубопровод. В результате давление жидкости на выходе из насоса повышается, а на входе в рабочее колесо создается разрежение, что обеспечивает подачу жидкости из приемного резервуара в насос.

Для создания требуемого вакуума при пуске всасывающий трубопровод и корпус насоса должны быть предварительно заполнены жидкостью.

К основным техническим показателям насоса относятся: подача Q , напор H , потребляемая мощность N и КПД η .

Подачей называется расход жидкости через напорный (выходной) патрубок.

Напор насоса – энергия, которую получила единица веса жидкости, пройдя через насос. Напор представляет разность удельных энергий в сечении (н-н) потока после насоса и перед ним (в-в). Согласно уравнению Бернулли

$$H = H_n - H_v = z_n - z_v + \frac{p_n - p_v}{\rho g} + \frac{v_n^2 - v_v^2}{2g}. \quad (8.1)$$

Для лабораторной установки, учитывая соотношение диаметров всасывающего и нагнетательного патрубков, формула принимает вид

$$H = \Delta z + \frac{p_n - p_v}{\rho g} + 0,64 \frac{v_n^2}{2g}, \quad (8.2)$$

где $\Delta z = z_n - z_v$ – вертикальное расстояние между точками замера p_v и p_n ($\Delta z = 0,2$ м).

Полезная мощность насоса

$$N_n = \rho g Q H, \quad (8.3)$$

где N_n – полезная мощность, Вт;

Q – подача, м³/с;

H – напор, м.

КПД насоса есть отношение полезной мощности к потребляемой (мощности на валу насоса)

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N} \quad (8.4)$$

КПД насоса учитывает потери энергии в насосе, которые могут быть объемные, гидравлические и механические. Каждый из этих видов потерь оценивается соответствующим КПД.

Таким образом, КПД насоса

$$\eta = \eta_o \eta_r \eta_m \quad (8.5)$$

где η_o – объемный КПД;

η_r – гидравлический КПД;

η_m – механический КПД.

Характеристика центробежного насоса – это графическая зависимость основных технических показателей от подачи при постоянных значениях частоты вращения n рабочего колеса, вязкости ν и плотности ρ жидкости на входе в насос (рисунок 8.1).

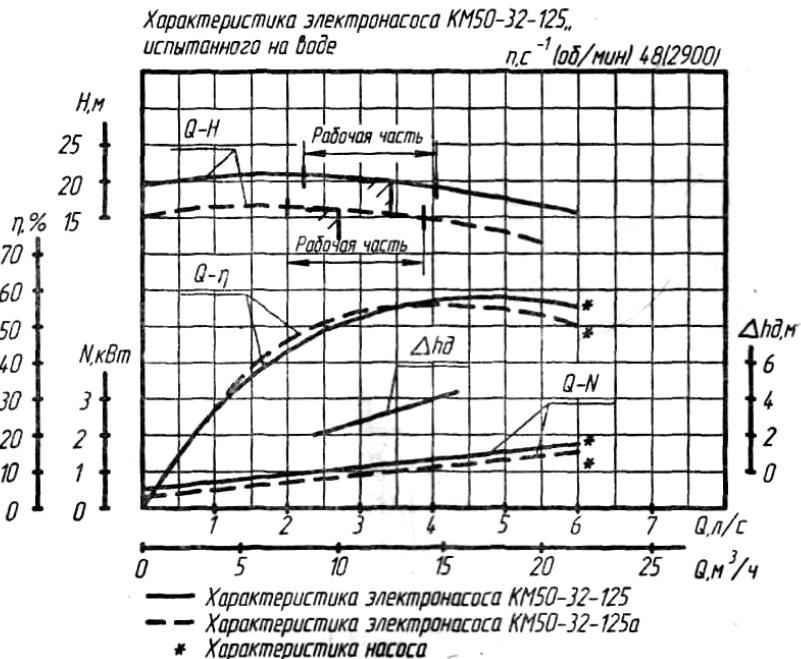


Рисунок 8.1 – Характеристики центробежного консольного моноблочного насоса марки КМ

Определить Q , H и N путем теоретического расчета по формулам довольно трудно, так как существует много факторов, которые не

поддаются точному определению. В силу этого характеристика насоса, построенная теоретически, плохо согласуется с данными опыта.

Рабочая характеристика может быть получена лишь опытным путем на натурном насосе или его модели. Такие характеристики, полученные на стенде, содержатся в паспорте насоса и имеются в каталогах.

Характеристика насоса марки КМ50-32-125 приведена на рисунке 8.1.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная насосная установка (рисунок 8.2) состоит из центробежного насоса 9, всасывающего 2 (внутренний диаметр $d = 53$ мм) и напорного 10 (внутренний диаметр $d = 41$ мм) трубопроводов, резервуара 5, вентилей 1, 4, 8 и 12, обратного клапана 3.

Электродвигатель насоса включается и выключается магнитным пускателем при полностью закрытых вентилеях 8 и 12.

Установка оборудована вакуумметром 7, манометром 11, ваттметром, счетчиком воды 6 и расходомером Вентури 13.

Подача насоса регулируется степенью открытия вентилей 8 и 12.

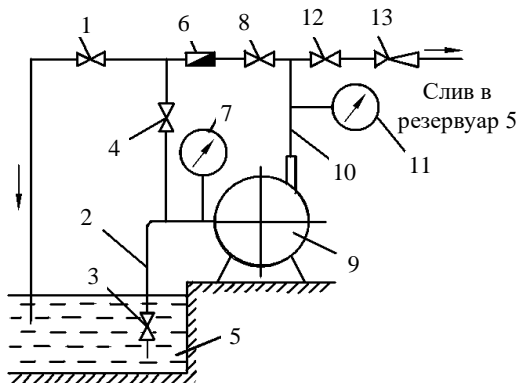


Рисунок 8.2 – Схема насосной установки

Заполнение всасывающей трубы и насоса водой перед пуском осуществляется из специального бака (на рисунке не показан).

Электродвигатель насоса включается и выключается магнитным пускателем при полностью закрытых вентилеях 8 и 12.

Техническая характеристика центробежного насоса:

- марка – КМ50-32-125;
- тип – консольный с односторонним подводом жидкости, одноступенчатый, моноблочный;
- диаметр рабочего колеса $D = 90$ мм;
- номинальная частота вращения вала $n = 2900$ об/мин;
- минимальный КПД $\eta_{\min} = 0,55$.

Порядок проведения опытов

1 Ознакомиться с принципом работы центробежного насоса, основными элементами насосной установки и их назначением.

2 Подготовить таблицу для опытных и расчетных данных (таблица 8.1).

3 После заполнения насоса и всасывающей трубы водой и удаления воздуха из них при закрытых напорных вентилях 4, 8 и 12 включить электродвигатель насоса.

4 При достижении установившегося режима работы насоса на холостом ходу, т. е. когда $Q = 0$, снять показания вакуумметра (p_v), манометра (p_n), ваттметра (N_s).

5 Регулируя подачу насоса вентилями 8 и 12 и измеряя ее с помощью счетчика воды и водомера Вентури, произвести одновременно замеры по указанным в п. 4 приборам, когда их показания стабилизируются.

6 Аналогичные замеры произвести при 6–8 различных подачах насоса, в том числе и при полном открытии вентилях 1, 4, 8 и 12. Результаты измерений занести в таблицу 8.1.

Обработка экспериментальных данных

1 Определить подачу насоса, л/с:

$$Q = vt + c\sqrt{\Delta H}, \quad (8.6)$$

где c – постоянный для водомера Вентури коэффициент, $c = 0,089$ л/с·см^{0,5}; ΔH – разность показаний пьезометров 5 и 6.

2 Определить скорость во всасывающем и напорном патрубках:

$$v = Q / \omega. \quad (8.7)$$

Площади живых сечений соответствующих патрубков $\omega_v = 22,06$ см², $\omega_n = 13,2$ см².

3 Определить напор насоса по формуле (8.1).

4 Определить полезную мощность насоса по формуле (8.3).

5 Определить мощность, потребляемую насосом, кВт:

$$N = 0,93N_s - 0,46. \quad (8.8)$$

6 Определить КПД насоса по формуле (8.4).

7 Результаты расчетов занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Опытные данные и результаты расчетов

Режим	Показания приборов				Показания счетчика воды		Расчетные данные					
	$p_{\text{в}}, \text{кгс/см}^2$	$p_{\text{н}}, \text{кгс/см}^2$	$N_{\text{в}}, \text{кВт}$	$\Delta H, \text{см}$	$V, \text{л}$	$t, \text{с}$	$Q, \text{л/с}$	$v_{\text{н}}, \text{м/с}$	$H, \text{м}$	$N_{\text{н}}, \text{кВт}$	$N, \text{кВт}$	η

Содержание отчета

- 1 Схема насосной установки.
- 2 Таблица с опытными и расчетными данными.
- 3 Расчеты всех величин для одного из режимов (кроме первого).
- 4 Комплексная характеристика насоса – графики изменения напора H , потребляемой мощности N и КПД η насоса от подачи Q .

Для удобства пользования все три графика следует расположить один под другим или на оси ординат отложить в масштабе значения H , N и η , а на оси абсцисс – значения Q .

В выводах сделать заключение об оптимальном режиме работы насоса (η_{max}) и указать значения величин Q , H и N , его характеризующих.

Контрольные вопросы

- 1 Принцип действия центробежного насоса.
- 2 Основные показатели насоса и порядок их определения.
- 3 Что называется напором, полезной мощностью и КПД насоса?
- 4 Регулирование центробежного насоса.
- 5 Методика определения характеристики насоса.
- 6 Порядок пуска насоса в работу.

Рекомендуемая литература: [1, с. 102–109; 2, с. 154–174].

ИНСТРУКЦИЯ

по охране труда для студентов, выполняющих лабораторные и практические работы на кафедре «Экология и рациональное использование водных ресурсов»

Общие требования безопасности

- 1 К выполнению лабораторных работ в учебных аудиториях кафедры "Экология и рациональное использование водных ресурсов" допускаются

лица, прошедшие инструктаж по охране труда и ознакомившиеся с мерами безопасности при выполнении лабораторных работ.

2 При нахождении в учебных лабораториях кафедры и выполнении лабораторных работ студенты обязаны соблюдать правила внутреннего трудового распорядка. Не допускается курение в учебных лабораториях кафедры.

3 Приборы и оборудование должны содержаться в исправном состоянии, сохранности и чистоте.

4 Студенты должны немедленно сообщать преподавателю о замеченных неисправностях и нарушениях правил техники безопасности и пожарной безопасности.

5 Студенты, выполняющие лабораторные и практические работы, должны уметь оказывать первую помощь пострадавшим.

6 Лица, нарушающие требования настоящей инструкции и требования безопасности при выполнении лабораторных работ, отстраняются от выполнения работ и привлекаются к ответственности в соответствии с правилами внутреннего распорядка БелГУТа.

Требования безопасности перед началом работ

1 Перед началом выполнения лабораторных работ студенты должны ознакомиться с методическими указаниями, порядком выполнения работ и мерами безопасности.

2 Проверить состояние оборудования и приборов и доложить преподавателю.

3 С рабочего места должны быть убраны все ненужные и лишние предметы. Рабочее место должно быть удобно для обслуживания, проходы вокруг рабочего места должны быть свободными.

4 Приборы необходимо располагать так, чтобы было удобно производить необходимые переключения и выполнять наблюдения.

Требования безопасности при выполнении работ

1 Включение приборов и экспериментальных установок производится после проверки преподавателем правильности сборки и подключения их к сети. Переключатели приборов при измерениях должны находиться в положениях, соответствующих режимам измерений.

2 Во избежание несчастных случаев запрещается выполнение работ, не предусмотренных тематикой занятий.

3 Не допускается производить какие-либо переключения, не предусмотренные порядком выполнения работ, в приборах, находящихся под напряжением.

4 Не допускается проходить к рабочим местам, где выполняются другие работы, ходить по лаборатории и оставлять без наблюдения свое рабочее место.

5 Не допускается выполнять лабораторные работы одному студенту.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1 К аварийным ситуациям могут привести:

- неисправность оборудования и приборов;
- нарушение изоляции токоведущих частей;
- нарушение порядка переключения приборов в рабочем режиме;
- нарушение правил пожарной безопасности.

2 При возникновении аварийных ситуаций студенты должны немедленно сообщать преподавателю и принимать меры к ликвидации их последствий.

В случае возникновения пожара необходимо немедленно сообщить по тел. 9–01 и руководству кафедры и университета. Принять меры по ликвидации очага возгорания средствами пожаротушения.

Во избежание поражения электрическим током запрещается тушение оборудования и приборов, находящихся под напряжением, химическими пенными огнетушителями.

3 В случае необходимости нужно оказать первую медицинскую помощь пострадавшему. Аптечка с медикаментами находится в помещении лаборатории.

Требования безопасности по окончании работ

1 По окончании лабораторных работ необходимо отключить приборы и лабораторное оборудование от электрической сети.

2 После окончания работы необходимо привести в порядок свое рабочее место и доложить об этом преподавателю. Следует доложить о недостатках, обнаруженных при выполнении работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Башта, Т. М.** Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учеб. для машиностроительных вузов / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1982. – 328 с.

2 Гидравлика и гидравлические машины : учеб. пособие для вузов / В. Ф. Медведев [и др.]. – Минск : Выш. шк., 1998. – 311 с.

3 Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод : учеб. пособие для вузов / Т.В. Артемьева [и др.] ; под ред. С. П. Стесина. – М. : Академия, 2005. – 336 с.

4 Гидравлика : учеб. пособие для вузов / Б. В. Ухин [и др.]. – М. : Форум : ИНФРА-М, 2009. – 464 с.

5 **Богдан, Н. В.** Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Пневматические и гидравлические системы . учеб. пособие / Н. В. Богдан. – Мн. : Ураджай, 2002. – 426 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ГИДРАВЛИКА»

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель дисциплины – дать студентам знания по основным разделам гидростатики, гидродинамики для понимания процессов, совершающихся в гидро- и пневмосистемах, а также в узлах трения механизмов; о гидромашинах, гидродинамических передачах, объемных гидроприводах и средствах гидроавтоматики, применяемых на транспорте.

Задачи дисциплины:

- изучить свойства капельной жидкости и основные законы, описывающие состояние покоящейся и движущейся жидкости;
- изучить состояние и перспективы использования гидро- и пневмосистем на железнодорожном транспорте;
- дать представление об основах проектирования гидравлических и пневматических передач;
- привить умение использовать расчетные методики для проектирования гидропередач;
- привить навыки исполнения и чтения гидравлических схем;
- привить навыки работы с контрольно-измерительными приборами.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Р а з д е л 1. Введение

1.1 История возникновения предмета. Предмет изучения дисциплины

Вклад ученых в развитие науки. Методика современных исследований.

Понятие "жидкость". Реальная, упругая, идеальная, капельная, неньютоновская жидкости. Свойства жидкости: плотность, удельный вес, относительная плотность, вязкость, текучесть, сжимаемость, капиллярность, растворимость газов, поверхностное натяжение, температурное расширение, сопротивление растяжению. Аномалии воды. Силы, действующие в жидкости: массовые и поверхностные, напряжения поверхностных сил. Единичная массовая сила.

Р а з д е л 2. Гидростатика жидкости

2.1 Гидростатическое давление. Абсолютный и относительный покой жидких сред

Единицы измерения давления. Атмосферное, избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давление. Техническая и физическая атмосфера. Нормальное атмосферное давление и способ его определения. Единицы измерения давления (Паскаль, бар). Свойства гидростатического давления. Вывод основного уравнения гидростатики. Закон Паскаля. Закон сообщающихся резервуаров. Гидростатический парадокс. Героновы фонтаны. Приборы для измерения гидростатического давления: металлический и жидкостный манометр, пьезометр, микроманометр, вакуумметр. Класс точности прибора, относительная и приведенная погрешности. Достоинства и недостатки приборов.

Уравнения Эйлера для покоящейся жидкости и их интегралы. Примеры применения уравнений Эйлера для решения практических задач.

2.2. Определение сил давления покоящейся среды на плоские стенки. Вывод закона Архимеда

Центр давления. Определение центра давления в случае прямоугольной площадки, одна сторона которой лежит на линии свободной поверхности. Архимедова сила. Условия плавания и остойчивости тела. Центр и объем водоизмещения, ватерлиния, запас плавучести тела. Плоскость плавания, ось плавания, осадка. Метацентр, определение метацентрической высоты. Практическое применение закона на примере решения задачи.

Р а з д е л 3. Гидродинамика жидкости

3.1 Виды движения жидкости. Два режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный

Установившееся и неустановившееся, равномерное и неравномерное, напорное и безнапорное движение жидкости. Элементы потока жидкости: линия тока, поверхность тока, трубка тока, элементарная струйка, нормальное (живое) сечение. Гидравлические элементы живого сечения. Гидравлический радиус. Длина смоченного периметра.

Расход воды: объемный, массовый, весовой. Средняя и мгновенная скорость движения жидкости. Уравнение неразрывности движения жидкости, уравнение неразрывности потока (вывод).

Опыты О. Рейнольдса. Нижний и верхний критические пределы числа Рейнольдса. Переходная область. Модель движения жидкости в трубопроводе. Коэффициент Кориолиса.

3.2 Вывод уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости

Геометрический смысл уравнения Бернулли. Геометрический, пьезометрический и скоростной напор. Полный напор, единица измерения. Использование трубки Пито для

определения скоростного напора. Пьезометрическая и напорная линии. Энергетический смысл уравнения Бернулли. Полная удельная энергия единицы веса жидкости.

Частный случай закона сохранения энергии. Пьезометрический и гидравлический уклоны. Потери напора на гидравлическое трение при ламинарном режиме движения. Коэффициент Дарси в случае ламинарного движения. Вывод уравнения Пуазейля. Закон Пуазейля. Вывод уравнения Вейсбаха-Дарси.

Случаи, когда теория определения коэффициента Дарси при ламинарном движении требует корректировки. Начальный участок ламинарного движения, движение в зазоре, движение с теплообменом, движение с большими перепадами давления.

3.3 Определение коэффициента Дарси

Гидравлически гладкие и шероховатые трубы. Эквивалентная шероховатость. Определение коэффициента внутреннего гидравлического трения в области гладкого, вязкого трения, в доквадратичной и квадратичной областях сопротивления. Уравнения Блазиуса, Альтшул, Шифринсона. Графики Никурадзе-Мурина. Определение коэффициента Дарси лабораторным способом.

3.4 Потери напора на местные сопротивления

Виды местных сопротивлений. Вывод уравнения Борда. Коэффициент местного сопротивления. Общее уравнение Вейсбаха. Коэффициенты местного сопротивления для различных видов сопротивлений (внезапное и плавное расширение и сужение, поворот трубопровода). Явление кавитации, число кавитации. Использование явления кавитации для решения задач энергосбережения. Методика решения практических задач с применением уравнения Бернулли.

3.5 Истечение жидкости через отверстия и насадки

Определение расхода и скорости истечения. Истечение через малое отверстие в тонкой стенке в атмосферу при постоянном напоре. Уравнение Торричелли. Коэффициенты скорости, сжатия и расхода. Истечение под уровень. Определение времени опорожнения резервуара. Истечение через насадки. Насадки Вентури, Борда. Коноидальный насадок, диффузионный насадок. Определение скорости и расхода при истечении через насадки.

3.6 Явление гидравлического удара

Модель гидроудара. Прямая и обратная ударные волны. Фаза и период гидроудара. Прямой и непрямо́й гидроудары. Определение превышения давления при прямом и непрямо́м гидроударах. Формула Н. Жуковского для определения скорости распространения ударной волны. Мероприятия по предотвращению гидроудара. Гидравлический таран. Использование силы ударной волны для подъема жидкости на высоту до 40 м.

3.7 Гидравлический расчет трубопроводов. Выбор насоса, работающего на трубопроводную систему

Трубопроводы простые и сложные, короткие и длинные. Гидравлический расчет простых трубопроводов. Построение трубопроводной характеристики. Примеры гидравлического расчета коротких трубопроводов (расчеты сифона, расходомера Вентури, всасывающей трубы насоса).

Построение трубопроводной характеристики в случае последовательного соединения трубопроводов. Построение трубопроводной характеристики в случае параллельного соединения трубопроводов.

Поле насосов, характеристики центробежных насосов. Рабочая точка.

3.8 Основы теории подобия

Геометрическое, кинематическое и динамическое подобие. Гидравлическое подобие в насосах. Прересчет характеристики насоса при переходе на другую частоту вращения. Критериальные числа. Критерии Ньютона, Вебера, Струхалия, Фруда, Рейнольдса, Маха.

Р а з д е л 4. Общие сведения о гидромашинах и гидравлических передачах

4.1 Общие сведения о гидромашинах

Общие сведения о гидромашинах. Принцип действия насосов, гидродвигателей, гидропередач. Рабочие жидкости.

4.2 Динамические насосы

Лопастные насосы. Основы теории лопастных насосов. Центробежные насосы. Осевые насосы. Основное уравнение центробежных насосов. Характеристики центробежных насосов. Основы теории гидродинамического подобия насосов. Работа насоса на сеть. Последовательное и параллельное включение насосов.

4.3 Гидродинамические передачи

Назначение и область применения гидродинамических передач. Устройство, принцип действия и классификация. Характеристики гидродинамических передач. Общие закономерности. Гидродинамические муфты, устройство и рабочий процесс гидромуфты. Основные параметры, уравнения и характеристики. Совместная работа гидромуфты с двигателем. Регулирование гидромуфт. Гидродинамические трансформаторы, устройство, классификация, характеристика.

4.4 Вспомогательная гидроаппаратура

Гидроаппаратура и элементы гидроавтоматики. Распределительные устройства: назначение, принцип действия и основные типы. Клапаны: принцип действия, устройство и характеристики. Дроссельные устройства, назначение, принцип действия. Фильтры и гидроаккумуляторы.

4.5 Схемы гидроприводов

Типовые схемы гидропривода СДМ. Основы теории и расчета объемного гидропривода.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие указания по выполнению лабораторных работ.....	3
Лабораторная работа № 1. Определение гидростатического давления.....	4
Лабораторная работа № 2. Определение режимов движения жидкости в трубопроводе.....	8
Лабораторная работа № 3. Опытная проверка уравнения Бернулли.....	11
Лабораторная работа № 4. Определение потерь напора по длине водопровода...	18
Лабораторная работа № 5. Определение местных потерь напора при движении воды в трубах.....	23
Лабораторная работа № 6. Истечение жидкости через отверстия и насадки.....	27
Лабораторная работа № 7. Изучение гидравлического удара в напорном трубопроводе.....	31
Лабораторная работа № 8. Испытания центробежного насоса.....	34
Инструкция по охране труда для студентов, выполняющих лабораторные и практические работы на кафедре «Экология и рациональное использование водных ресурсов».....	39
Список литературы.....	41
Приложение А. Учебная программа по дисциплине «Гидравлика».....	42

Учебное издание

ВОСТРОВА Регина Николаевна
СЫЦКО Петр Георгиевич
НОВИКОВА Ольга Константиновна

ГИДРАВЛИКА

Лабораторный практикум

Редактор *И. И. Эвентов*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *Т. А. Пугач*

Подписано в печать 31.01.2011 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,52. Тираж 400 экз.
Зак. № . Изд. № 129.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.

246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.