

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА МАШИНОВЕДЕНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплинам:

«Механика жидкости и газа»

для студентов специальности 6-05-0714-02

*Технология машиностроения, металлорежущие станки
и инструменты (профилизация «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»);*

«Гидро- и пневмопривод, гидро- и пневмоавтоматика»

для студентов специальности 6-05-0714-02

*Технология машиностроения, металлорежущие станки
и инструменты (профилизация «Технология машиностроения»);*

*«Гидро- и пневмопривод» для студентов специальности
6-05-0714-04 Технологические машины и оборудование*

**ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ГИДРОМЕХАНИКИ
ЧАСТЬ 1**

УДК 621.62 – 822 (035)

Методические указания предназначены для оказания помощи студенту при подготовке к выполнению и защите лабораторных работ по дисциплинам:

«Механика жидкости и газа» для студентов специальности 6-05-0714-02 Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты (профилизация «Технологическое оборудование машиностроительного производства»);

«Гидро- и пневмопривод, гидро- и пневмоавтоматика» для студентов специальности 6-05-0714-02 Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты (профилизация «Технология машиностроения»);

«Гидро- и пневмопривод» для студентов специальности 6-05-0714-04 Технологические машины и оборудование.

В первую часть методических указаний включены лабораторные работы, выполняемые на базе виртуальной лаборатории гидромеханики.

Методические указания составлены на основе документации, предоставленной VirtLabs SUNSPIRE.

Издаётся в 2-х частях. Часть 1.

Составители: В. М. Голуб, к. т. н., доцент
К. Т. Аббасов, ассистент

Рецензент: С. Д. Рачковский, заместитель главного инженера
СП ОАО «Брестгазоаппарат»

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИНЦИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛЮ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ГИДРОСТАТИКИ И ЗАКОНА ПАСКАЛЯ.....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ В СЕЧЕНИИ КРУГЛОЙ ТРУБЫ	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ В АТМОСФЕРУ.....	37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ	43

ПРИНЦИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛЮ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Имитационная модель лабораторной установки представляет собой интерактивную геометрическую структуру, помещенную в виртуальное трехмерное пространство. Наблюдение за объектами осуществляется с помощью виртуальной камеры. В базовом (свободном) режиме камера может вращаться вокруг точки фокусировки (рисунок 1). Точка фокусировки камеры может перемещаться в вертикальной фронтальной плоскости. Кроме того, камера может дистанцироваться относительно точки фокусировки на произвольное расстояние, ограниченное габаритами трехмерного пространства.

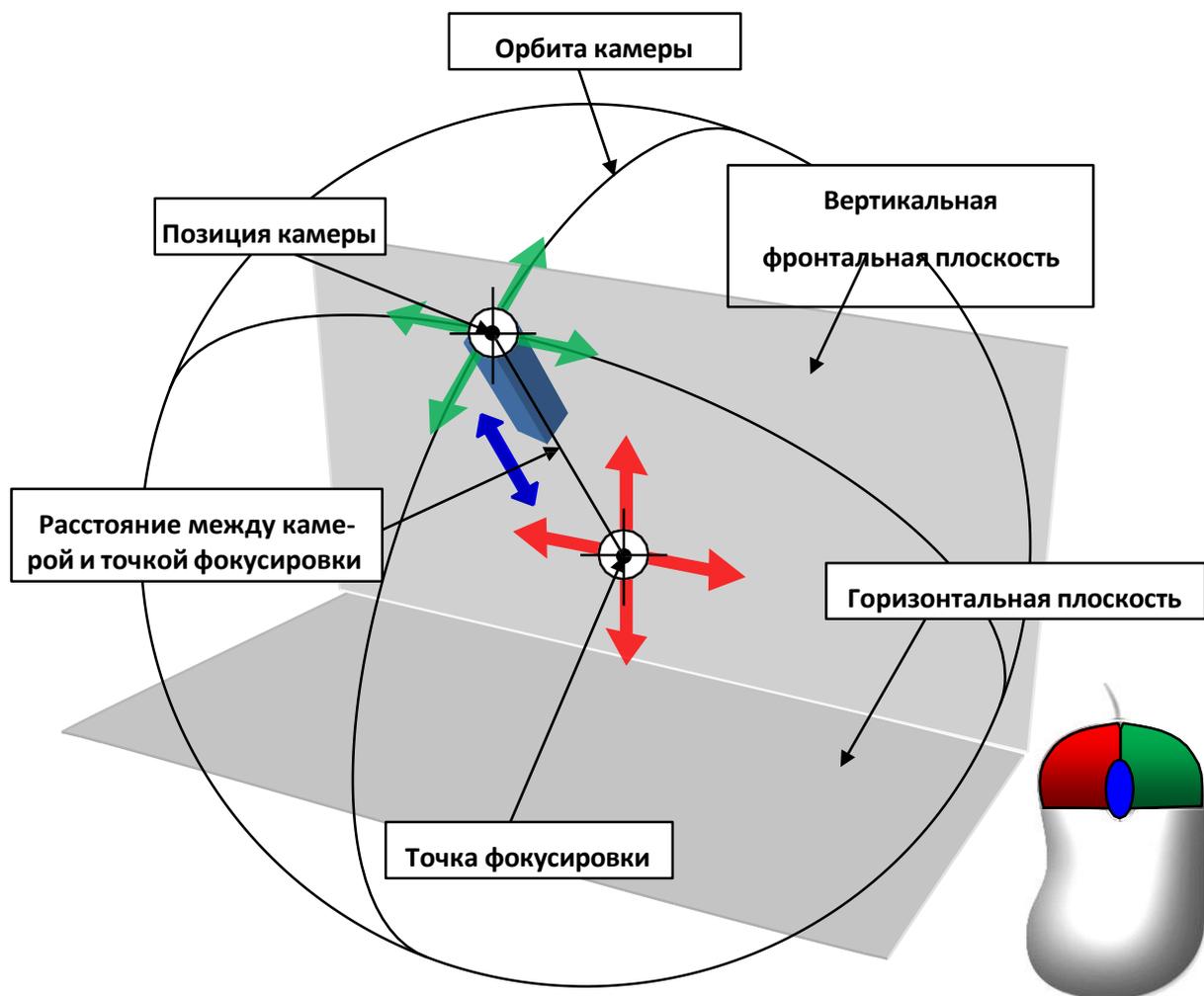


Рисунок 1 – Принципы управления камерой в свободном режиме

Основные манипуляции с камерой в свободном режиме осуществляются с помощью компьютерной мыши. При этом нажатие и удерживание левой кнопки мыши с сопутствующим перемещением мыши приводит к перемещению точки фокусировки камеры во фронтальной плоскости пространства. Нажатие и удерживание правой кнопки мыши с сопутствующим перемещением мыши приводит к вращению камеры относительно точки фокусировки. Углы вращения (азимут и элевация) камеры ограничены габаритами трехмерного пространства.

Изменение дистанции камеры осуществляется вращением колеса прокрутки мыши в прямом и обратном направлениях.

Примечание – в некоторых лабораторных работах функция вращения камеры может отсутствовать!

Помимо свободного режима камера может переключаться на отдельные элементы лабораторной установки. Переключение камеры на отдельный объект осуществляется путем наведения указателя мыши на данный объект с последующим одинарным кликом левой кнопки мыши. При этом камера может занять статичное положение или иметь возможность перемещаться в вертикальной плоскости путем наведения указателя мыши к краям экрана или с помощью курсорных клавиш клавиатуры. Необходимость дополнительного перемещения камеры в режиме работы с объектом обусловлена превышением габаритных размеров просматриваемого объекта над габаритными размерами экрана. Возврат камеры в исходный режим кликом в произвольной области экрана.

Интерактивное взаимодействие с управляющими элементами имитационной лабораторной установки осуществляется путем наведения указателя мыши на данный объект с последующим нажатием (или одинарным кликом) левой (или правой) кнопки мыши. Специфика управления для конкретных элементов может различаться. К примеру, непрерывно регулирующие элементы (вентили регулирования расхода и др.) для изменения своего состояния требуют нажатия и продолжительного удерживания левой или правой (в случае обратного движения) кнопки мыши. Элементы дискретного действия (задвижки и клапаны) требуют одинарного клика левой кнопки мыши.

В момент наведения указателя мыши на объект, манипуляции с камерой временно недоступны. В тоже время в процессе манипулирования камерой невозможно выполнение действий с элементами управления лабораторной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ГИДРОСТАТИКИ И ЗАКОНА ПАСКАЛЯ

1 Цель работы

1.1. Определить с помощью пружинных манометров гидростатическое давление в трех точках (1, 2, 3), заглубленных на различную величину h под уровень жидкости, находящейся в абсолютном покое под действием силы тяжести.

1.2. Подтвердить на основании опытных данных основное уравнение гидростатики и закон Паскаля.

1.3. Построить по данным опытов № 1, 2 в масштабе эпюры манометрического давления по глубине h .

2 Общие сведения

Гидростатическим давлением p называют нормальное сжимающее напряжение, возникающее в покоящейся жидкости под действием поверхностных и массовых сил:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S}, \quad (1)$$

где ΔF – элементарная равнодействующая поверхностных и массовых сил (гидростатическая сила), Н;

ΔS – элементарная площадка действия, м^2 .

Из формулы (1) видно, что гидростатическое давление p есть предел отношения элементарной гидростатической силы ΔF к элементарной площади действия ΔS , когда последняя стремится к нулю.

За единицу гидростатического давления принято равномерно распределенное давление в один Паскаль (Па), то есть создаваемое силой 1 Н на площади 1 м^2 или $p = 1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Гидростатическое давление, отсчитываемое от абсолютного нуля, называют абсолютным (p_{abs}), а отсчитываемое от атмосферного давления (p_{atm}) – избыточным (p_{over}), следовательно,

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{over}. \quad (2)$$

Очевидно, что

$$p_{over} = p_{abs} - p_{atm}. \quad (3)$$

В гидравлических расчетах величину нормального атмосферного давления считают равной $p_{atm} = 98100 \approx 10^5 \text{ Па}$.

Из формулы (3) видно, что в зависимости от соотношения между p_{abs} и p_{atm} , избыточное давление p_{over} может быть положительной и отрицательной величиной. Положительное избыточное давление называют манометрическим, а отрицательное – вакуумметрическим. Приборы, применяемые для измерения $+p_{over}$ и $-p_{over}$, называют манометрами и вакуумметрами соответственно. По принципу действия манометры и вакуумметры делятся на две группы: жидкостные и механические.

Жидкостный манометр (пъезометр) представляет собой стеклянную трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний присоединен к точке, где измеряется манометрическое давление.

Манометрическое давление p_{over} , выраженное через показания пъезометра:

$$p_{over} = \rho \cdot g \cdot h_{p_{over}}, \quad (4)$$

где $\rho g = \gamma$ – объемный вес жидкости;

$h_{p_{over}}$ – пъезометрическая высота, то есть высота, отсчитываемая от точки подключения пъезометра до уровня жидкости в нем.

Работа механических приборов основана на деформации под воздействием давления упругого элемента (пружинны или мембраны). Заметим, что пружинный манометр показывает давление в точке жидкости на уровне оси вращения его стрелки. Если положение оси вращения стрелки и точки подключения манометра по высоте не совпадают, в показание манометра (p_m) вводят поправку ($\pm \rho g y_m$):

$$p_{over} = p_m \pm \rho \cdot g \cdot y_m, \quad (5)$$

где y_m – превышение оси вращения стрелки манометра над точкой его подключения, м.

В данной лабораторной работе предусмотрено измерение манометрического давления пружинными манометрами.

Когда на покоящуюся жидкость действует только сила тяжести, распределение гидростатического давления p по глубине h описывается основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (6)$$

где p – гидростатическое давление в жидкости на глубине h , Па;

p_0 – внешнее давление, т. е. гидростатическое давление на свободной поверхности жидкости, Па;

h – глубина погружения в жидкость рассматриваемой точки, м;

$\rho g h$ – весовое давление, т. е. гидростатическое давление, создаваемое весом столба жидкости высотой h , Па.

Как видно из уравнения (6), при $p_0 = const$ и $\rho g = const$ давление p с изменением величины h меняется по линейному закону, что предстоит подтвердить опытами. Вычислив по уравнению (6) давление p в двух точках, заглубленных на разную величину h , можно построить диаграмму распределения гидростатического давления по глубине, называемую эпюрой гидростатического давления. Из уравнения (6) следует также, что внешнее давление p_0 в покоящейся жидкости передается во все точки ее объема без изменения. Это следствие называют законом Паскаля: «Внешнее давление, приложенное к поверхности жидкости, находящейся в равновесии в замкнутом сосуде, передается во все точки жидкости без изменения». Справедливость этого закона предстоит проверить опытным путем в данной работе.

3 Описание опытной установки

Симуляционная модель лабораторной установки (рисунок 1.1) включает тонкостенную стальную колонну (1), частично заполненную водой, уровень

воды в которой измеряется пьезометрической трубкой со шкалой (2). Вода подается в колонну открытием вентиля (3).

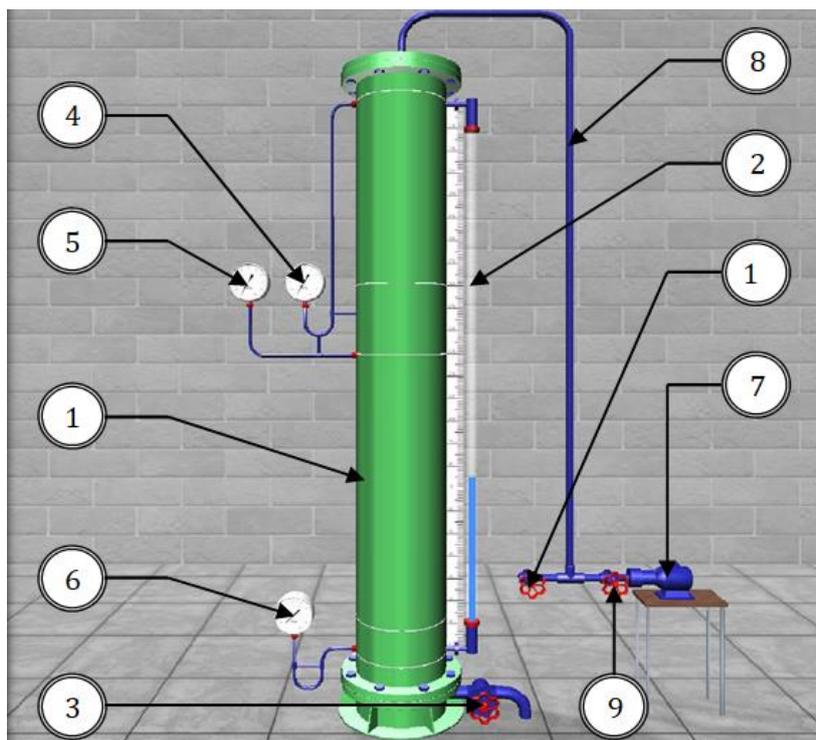


Рисунок 1.1 – Внешний вид симуляционной лабораторной установки

Для измерения гидростатического давления над свободной поверхностью жидкости в точке 1 и в точках 2 и 3 (на глубинах h_2 и h_3) установлены механические манометры M_1 (4), M_2 (5) и M_3 (6).

Сжатый воздух от компрессора (7) можно подавать в верхнюю часть колонны над свободной поверхностью жидкости по трубопроводу (8), открыв вентиль (9). Избыточное давление из верхней части колонны сбрасывается с помощью вентиля (10).

4 Порядок проведения работы

Необходимо выполнить два опыта, обеспечив в первом $p_0 = 0$, а во втором $p_0 > 0$.

Опыт № 1. Открыть вентиль подачи воды, наполнить установку до отметки, указанной преподавателем, и измерить с помощью водомерной трубки и шкалы глубины погружения h_2 и h_3 точек 2 и 3, а также превышения y_2 и y_3 осей вращения стрелок манометров M_2 и M_3 над точками их подключения. Затем измерить показания всех трех манометров (M_1 , M_2 и M_3). Полученные данные записать в таблицу 1.1.

Опыт № 2. Закрыть вентиль для сброса избыточного давления, а вентиль для подачи сжатого воздуха открыть и включить компрессор. Довести p_0 до величины, указанной преподавателем, после чего компрессор отключить. Далее измерить показания манометров M_1 , M_2 и M_3 . Результаты измерений записать в таблицу 1.1.

Выполнить все вычисления, предусмотренные таблицей 1.1. Дать заключение по результатам работы. Построить по данным опытов № 1, 2 в масштабе эпюры манометрического давления на стенку цилиндра по глубине h .

5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Схему лабораторной установки.
- 5.3. Основные теоретические и расчетные формулы.
- 5.4. Таблицу с данными измерений и результатами расчетов.
- 5.5. Эпюры манометрического давления на стенку цилиндра по глубине.

Таблица 1.1 – Результаты исследований по определению гидростатического давления

№	Измеряемые и вычисляемые величины	Ед. изм.	Эксперимент. данные		Примечания
			Опыт 1	Опыт 2	
1	Показания манометров M_1, M_2, M_3	$p_{M1} \approx p_0$	Па		$h_1 = \text{--- м}$
		p_{M2}	Па		$h_2 = \text{--- м}$
		p_{M3}	Па		$h_3 = \text{--- м}$
2	Избыточное гидростатическое давление в точках 1, 2, 3	$p_1 \approx p_{M1} \approx p_0$	Па		$y_{m2} = \text{--- м}$
		$p_2 = p_{M2} + \rho g y_{m2}$	Па		$y_{m3} = \text{--- м}$
		$p_3 = p_{M3} + \rho g y_{m3}$	Па		$\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
3	Приращение избыточного гидростатического давления	$\Delta p_1 \approx \Delta p_0 = p_{0_2} - p_{0_1}$	Па		
		$\Delta p_2 = p_{2_2} - p_{2_1}$	Па		
		$\Delta p_3 = p_{3_2} - p_{3_1}$	Па		
4	Средняя величина приращения избыточного гидростатического давления	$\Delta p_{av} = \frac{\Delta p_0 + \Delta p_2 + \Delta p_3}{3}$	Па		
5	Относительные расхождения приращений давления в точках 1, 2, 3 со средней величиной	$E_{\Delta p_0} = \frac{ \Delta p_{av} - \Delta p_0 }{\Delta p_{av}} \cdot 100$	%		
		$E_{\Delta p_2} = \frac{ \Delta p_{av} - \Delta p_2 }{\Delta p_{av}} \cdot 100$	%		
		$E_{\Delta p_3} = \frac{ \Delta p_{av} - \Delta p_3 }{\Delta p_{av}} \cdot 100$	%		

6 Вопросы для самопроверки

- 6.1. Что такое гидростатическое давление и каковы его свойства?
- 6.2. Поясните, что такое абсолютное и избыточное гидростатическое давление и какова связь между ними?
- 6.3. Объясните, что понимают под терминами: «внешнее давление» и «весовое давление»?
- 6.4. Напишите и поясните основное уравнение гидростатики.
- 6.5. Сформулируйте закон Паскаля.
- 6.6. Назовите приборы для измерения избыточного гидростатического давления и поясните принципы их действия.
- 6.7. Поясните, что такое пьезометрическая высота?
- 6.8. Эпюра гидростатического давления, как ее строят и с какой целью?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

1 Цель работы

- 1.1. Изучить работу насосной установки с центробежным насосом.
- 1.2. Освоить методику параметрических испытаний центробежного насоса.
- 1.3. Получить характеристику центробежного насоса.

2 Общие сведения

Параметрические испытания проводятся с целью определения технических показателей (параметров) и характеристик насосов.

Работа насоса характеризуется следующими основными техническими показателями: подачей, напором, мощностью, коэффициентом полезного действия (КПД), частотой вращения и допускаемым кавитационным запасом.

1. Подача насоса Q – объем жидкости, перекачиваемый насосом в единицу времени ($\text{м}^3/\text{с}$, л/с, $\text{м}^3/\text{ч}$).

Массовая подача насоса G – масса жидкости, перекачиваемая насосом в единицу времени (кг/с, кг/ч). Массовая подача через плотность жидкости ρ [$\text{кг}/\text{м}^3$] связана с объемной зависимостью:

$$G = \rho \cdot Q . \quad (1)$$

Идеальная (теоретическая) подача насоса Q_t – сумма подачи насоса Q и объемных потерь ΔQ

$$Q_t = q + \Delta Q . \quad (2)$$

Объемные потери возникают в результате перетекания (утечек) жидкости под действием перепада давления из напорной полости во всасывающую и изменяются при прочих равных условиях практически прямо пропорционально перепаду давления Δp :

$$\Delta Q = \alpha \cdot \Delta p , \quad (3)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

2. Напор насоса H – приращение полной удельной энергии жидкости, проходящей через насос (м). Для работающего насоса напор можно определить по показаниям манометра и вакуумметра:

$$H = \frac{p_M \pm p_V}{\rho g} + z_M + \frac{v_P^2 + v_S^2}{2g} , \quad (4)$$

где p_M и p_V – показания манометра и вакуумметра, расположенных, соответственно, на напорном и всасывающем патрубках насоса, Па;

z_M – превышение оси вращения стрелки манометра над точкой подключения вакуумметра, м;

v_P и v_S – средние скорости движения жидкости в напорном и всасывающем трубопроводах соответственно, м/с.

Знак «минус» в формуле (4) перед p_V ставится в том случае, когда на входе в насос избыточное давление, т. е. насос работает «в подпоре».

3. Мощность насоса N – мощность, потребляемая насосом:

$$N = M \cdot \omega , \quad (5)$$

где M и ω – крутящий момент на валу и угловая скорость вала насоса.

Полезная мощность N_{pump} – мощность, сообщаемая насосом перекачиваемой жидкости и определяемая зависимостью:

$$N_{pump} = p \cdot Q = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q . \quad (6)$$

Мощность насоса N больше полезной мощности N_{pump} на величину потерь энергии, учитываемых КПД.

4. КПД насоса η – отношение полезной мощности и мощности насоса:

$$\eta = \frac{N_{pump}}{N} . \quad (7)$$

КПД насоса учитывает все виды потерь энергии, связанные с передачей ее перекачиваемой жидкости. Потери энергии в насосе складываются из механических, гидравлических и объемных.

Механические потери – потери на трение в подшипниках, сальниках, поршня о стенки цилиндра и т. п.

Гидравлические потери – потери, связанные с преодолением гидравлических сопротивлений в рабочих органах насоса.

Объемные потери – потери, обусловленные утечкой жидкости из напорной полости насоса во всасывающую через зазоры. В связи с этим следует различать механический, гидравлический и объемный КПД.

Механический КПД насоса η_M – величина, выражающая относительную долю механических потерь энергии в насосе:

$$\eta_M = \frac{N - \Delta N_M}{N} = \frac{N_t}{N} , \quad (8)$$

где ΔN_M – мощность механических потерь;

N_t – мощность насоса за вычетом мощности механических потерь (теоретическая мощность).

Гидравлический КПД насоса η_H – отношение полезной мощности насоса к сумме полезной мощности и мощности, затраченной на преодоление гидравлических сопротивлений в насосе:

$$\eta_H = \frac{N_{pump}}{N_{pump} + \Delta N_H} = \frac{pQ}{pQ + \Delta p_H Q} = \frac{p}{p + \Delta p_H} = \frac{H}{H + \Delta H_H} , \quad (9)$$

где ΔN_H – мощность, необходимая на преодоление гидравлических сопротивлений в насосе;

Δp_H , ΔH_H – потери давления или напора на преодоление гидравлических сопротивлений в рабочих органах насоса.

Объемный КПД насоса η_V – отношение полезной мощности насоса к сумме полезной мощности и мощности, потерянной с утечками:

$$\eta_V = \frac{N_{pump}}{N_{pump} + \Delta N_{outflow}} = \frac{pQ}{pQ + p\Delta Q} = \frac{Q}{Q + \Delta Q} = \frac{Q}{Q_t}, \quad (10)$$

где $\Delta N_{outflow}$ – мощность, необходимая на утечки.

Связь КПД насоса с другими частными КПД можно представить в виде:

$$\eta = \frac{N_{pump}}{N} = \frac{N_t N_{pump}}{N \cdot N_t} = \eta_M \frac{pQ}{(p + \Delta p_H)(Q + \Delta Q)} = n_M n_H n_0. \quad (11)$$

Допускаемый кавитационный запас Δh_{perm} – кавитационный запас, обеспечивающий работу насоса без изменения основных технических показателей (без кавитации).

Для правильной эксплуатации насосов и их подбора необходимо знать, как изменяются основные технические показатели насоса (H , N , η , Δh_{perm}) при изменении его подачи Q , т. е. знать его характеристику.

Характеристика центробежного насоса – графическая зависимость напора H , мощности N , КПД η и допускаемого кавитационного запаса Δh_{perm} (или допускаемого вакуума) от подачи Q при постоянных значениях частоты вращения рабочего колеса, вязкости и плотности жидкости на входе в насос. Она включает три характеристики: напорную $H = f(Q)$, энергетическую (две кривых) – $N = f(Q)$; $\eta = f(Q)$ и кавитационную – $\Delta h_{perm} = f(Q)$. Характеристики получают в результате параметрических испытаний насосов на заводах-изготовителях и помещают в каталогах. На рисунке 2.1 приведены характеристики насоса К90/85 (4К-6) при $n = 2900$ об/мин для рабочего колеса с диаметрами $D_2 = 272$ мм и $D_2 = 250$ мм (обточенного). Для последнего кривые показаны пунктиром.

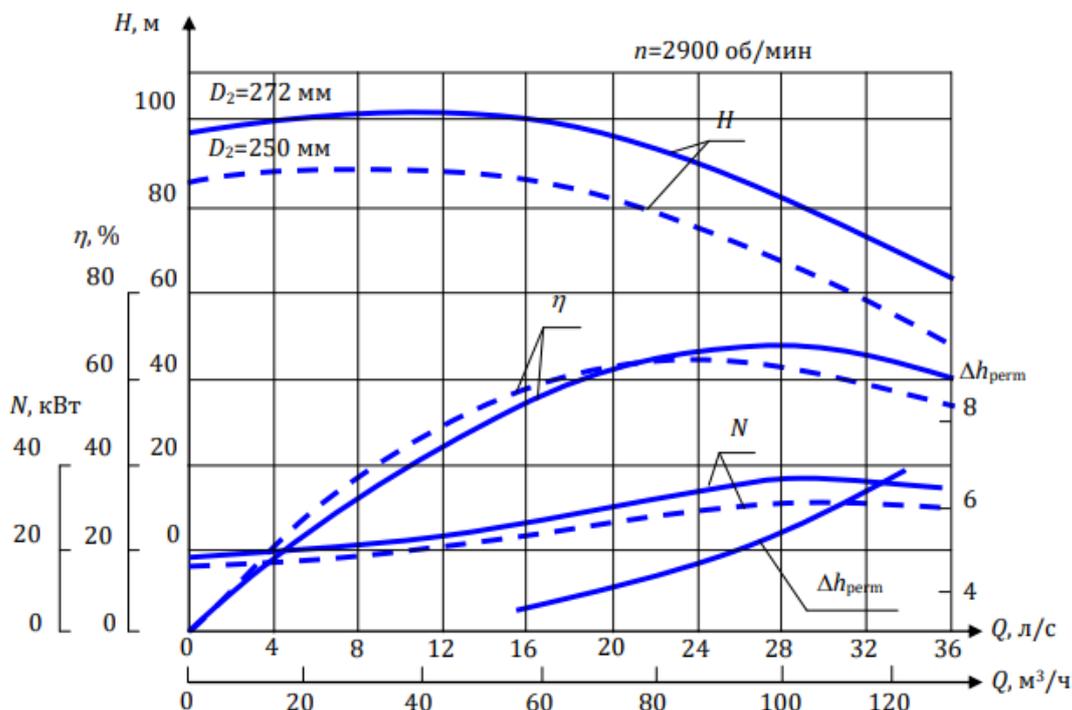


Рисунок 2.1 – Характеристика насоса К90/85 (4К-6)

На напорных характеристиках волнистыми линиями показана рекомендуемая область применения насоса по подаче и напору (поле насоса $Q - H$), получаемая изменением частоты вращения или обточкой рабочего колеса по внешнему диаметру. В пределах поля насоса КПД имеет максимальное значение или меньше его не более чем на 10 %.

3 Описание опытной установки

Симуляционная модель лабораторной установки (рисунок 2.2) включает центробежный насос (1) с электродвигателем (2), всасывающий трубопровод (3) с обратным клапаном, напорный трубопровод (4) с вентилем (5) изменения расхода, пульт включения электропитания (6) и контрольно-измерительная аппаратура: весы (7), манометр (8), вакуумметр (9), дифференциальный манометр (10) и тахометр (11).

Контрольно-измерительная аппаратура служит для замера подачи (диафрагма и ртутный дифференциальный манометр), давления на выходе из насоса (манометр), вакуума на входе в насос (вакуумметр), крутящего момента на валу насоса (балансирный электродвигатель с рычагом и весами) и частоты вращения вала электродвигателя (тахометр).

Для заливки водой насоса и всасывающего трубопровода на действующей физической модели последний соединяется с вакуумным насосом, который создает необходимый вакуум во всасывающем трубопроводе перед пуском насоса. Под разностью давлений на свободной поверхности воды в приемном резервуаре и во всасывающем трубопроводе открывается клапан и вода заполняет трубопровод и насос.

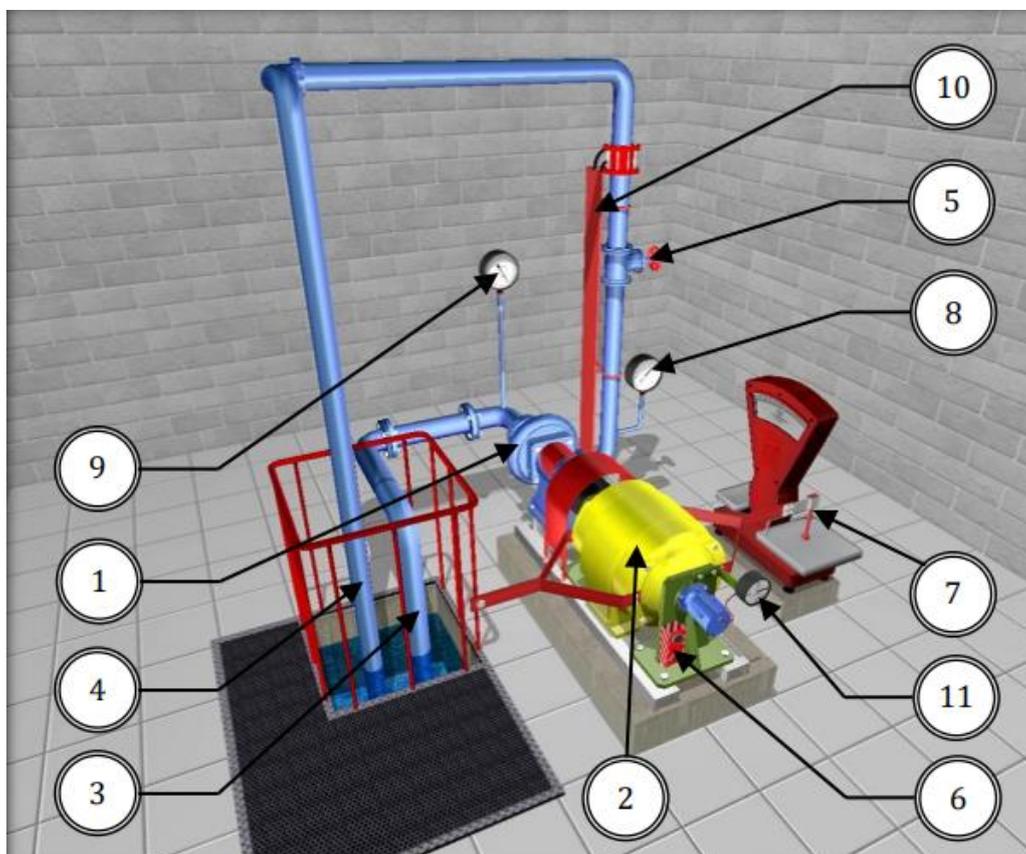


Рисунок 2.2 – Внешний вид симуляционной лабораторной установки

4 Порядок проведения работы

4.1. При закрытом вентиле изменения расхода залить водой всасывающий трубопровод и насос, а затем включить насос с пульта включения электропитания.

4.2. При закрытом вентиле изменения расхода, когда $Q = 0$, снять показания дифференциального манометра, вакуумметра, манометра, весов и тахометра.

4.3. Создать не менее восьми различных режимов работы насоса с помощью вентиля изменения расхода, обеспечивая различную подачу вплоть до Q_{\max} . При каждом режиме снимать показания приборов. Результаты замеров записать в таблицу 2.2.

4.4. Вычислить параметры, необходимые для построения напорной и энергетической характеристик:

– подачу насоса Q_{exp} [л/с] по формуле

$$Q_{exp} = C\sqrt{h}, \quad (12)$$

где C – постоянная диафрагмы ($C = 0,7$);

h – перепад давлений по дифманометру, мм. рт. ст.

Полученную подачу насоса Q_{exp} , л/с, перевести в Q_{exp} , м³/с;

– средние скорости движения жидкости v_S и v_P во всасывающем и напорном трубопроводах, м/с:

$$v_S = \frac{4Q_{exp}}{\pi d_S^2}, \quad (13)$$

$$v_P = \frac{4Q_{exp}}{\pi d_P^2}, \quad (14)$$

где Q_{exp} – подача насоса, м³/с;

d_S и d_P – диаметры соответственно всасывающего и напорного трубопроводов, м (выбираются в зависимости от типа применяемого насоса (таблица 2.1));

– напор насоса H_{exp} , м, – по формуле (4), полагая, что $z_M = 0,34$ м;

– мощность насоса N_{exp} , Вт, по формуле

$$N_{exp} = M \cdot \omega = (F - F_0) \cdot L \cdot \frac{\pi \cdot n_{exp}}{30}, \quad (15)$$

где M – крутящий момент на валу насоса, Н•м;

ω – угловая скорость вала насоса, рад/с;

F – показания весов, Н;

F_0 – показания весов при отключенном насосе, Н ($F_0 = 0$);

L – длина плеча рычага, м ($L = 0,716$ м);

n_{exp} – частота вращения вала насоса, об/мин.

Поскольку при каждом режиме работы частота поп может отличаться от номинальной n_{nom} ($n_{nom} = 2900$ об/мин), подачу Q_{exp} , л/с, напор H_{exp} и мощность N_{exp} необходимо привести к величине n_{nom} по формулам подобия:

$$Q = Q_{exp} \frac{n_{nom}}{n_{exp}}, \quad (16)$$

$$H = H_{exp} \left(\frac{n_{nom}}{n_{exp}} \right)^2, \quad (17)$$

$$N = N_{exp} \left(\frac{n_{nom}}{n_{exp}} \right)^3, \quad (18)$$

после чего значения Q , л/с перевести в Q , м³/с.

Полезную мощность N_{pump} , Вт и КПД насоса η вычислить по формулам (6) и (7), подставляя в формулу (6) значения Q , м³/с.

Результаты вычислений записать в таблицу 2.2.

4.5. По данным таблицы 2.2 построить графические зависимости $H = f(Q)$, $N = f(Q)$, $\eta = f(Q)$, принимая для этого значения Q в л/с.

4.6. Дать заключения по лабораторной работе.

Таблица 2.1 – Диаметры всасывающего и напорного трубопроводов в лабораторной установке

Модель насоса	Диаметр всасывающего трубопровода d_s , м	Диаметр напорного трубопровода d_p , м
К 18/8 (1.5К 6)	0,05	0,032
К 20/20 (2К 6)	0,065	0,05
К 20/18 (2К 9)		
К 45/55 (3К 6)	0,08	0,065
К 45/30 (3К 9)		
К 90/85 (4К 6)	0,1	

Таблица 2.2 – Результаты параметрических испытаний центробежного насоса

Измерения					Вычисления											
P_M , Па	P_V , Па	h , мм.рт.	F , Н	n_{exp} , об/мин	Q_{exp} , л/с	Q_{exp} , м ³ /с	v_s , м/с	v_p , м/с	H_{exp} , м	N_{exp} , Вт	Q , л/с	H , м	N , Вт	Q , м ³ /с	N_{pump} , Вт	η

5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Схему лабораторной установки.
- 5.3. Основные теоретические и расчетные формулы.
- 5.4. Таблицу с данными измерений и результатами расчетов.
- 5.5. Графические зависимости $H = f(Q)$, $N = f(Q)$, $\eta = f(Q)$.

6 Вопросы для самопроверки

6.1. Назовите технические показатели насоса.

6.2. Что такое подача насоса, идеальная подача и как она определяется при испытаниях?

6.3. Что такое напор насоса и как его определить по показаниям приборов?

6.4. Что такое мощность насоса и полезная мощность?

6.5. Что такое КПД насоса? Какие потери учитывает КПД насоса и его связь с другими КПД?

6.6. Что называется характеристикой насоса?

6.7. Что называется полем насоса $Q - H$ и связь его с КПД насоса?

6.8. Показания каких приборов необходимо знать для определения мощности насоса и полезной мощности?

6.9. Как изменяются подача, напор и мощность насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса?

6.10. Как в работе определяется крутящий момент на валу насоса M ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ В СЕЧЕНИИ КРУГЛОЙ ТРУБЫ

1 Цель работы

1.1. Научиться замерять скорости в заданных точках сечения с помощью трубки полного напора (скоростной трубки) и пьезометра.

1.2. Определить расход потока по эпюре скоростей и сравнить его с расходом, замеренным другим способом.

2 Общие сведения

Скорости потока жидкости в трубопроводах обычно вычисляют по скоростному напору, измеряемому по разности показаний скоростных трубок (трубок полного напора) и пьезометров.

На рисунках 3.1 и 3.2 показаны схемы измерения скоростей с помощью угловой трубки полного напора.

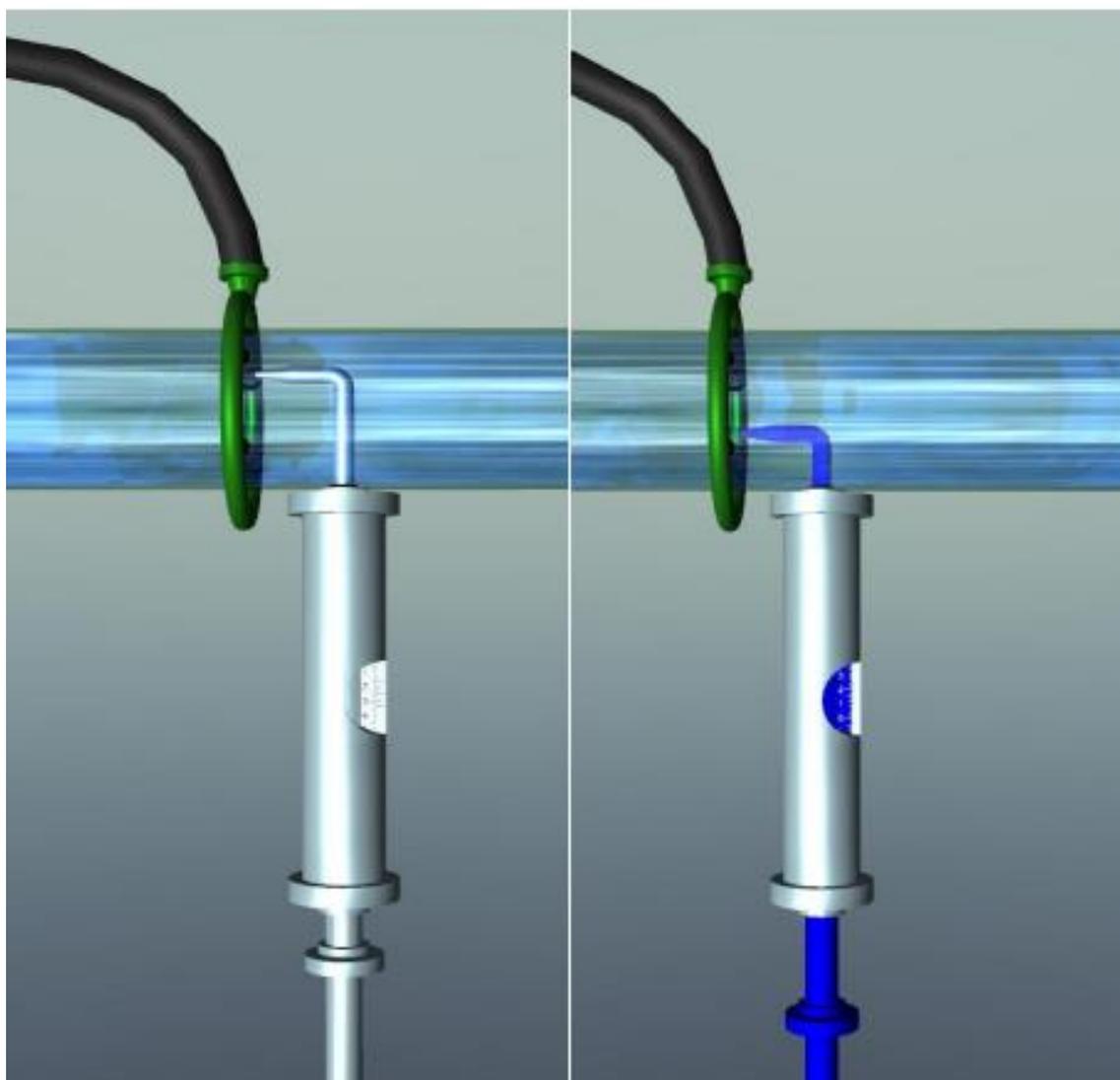


Рисунок 3.1 – Изменение положения угловой трубки полного напора

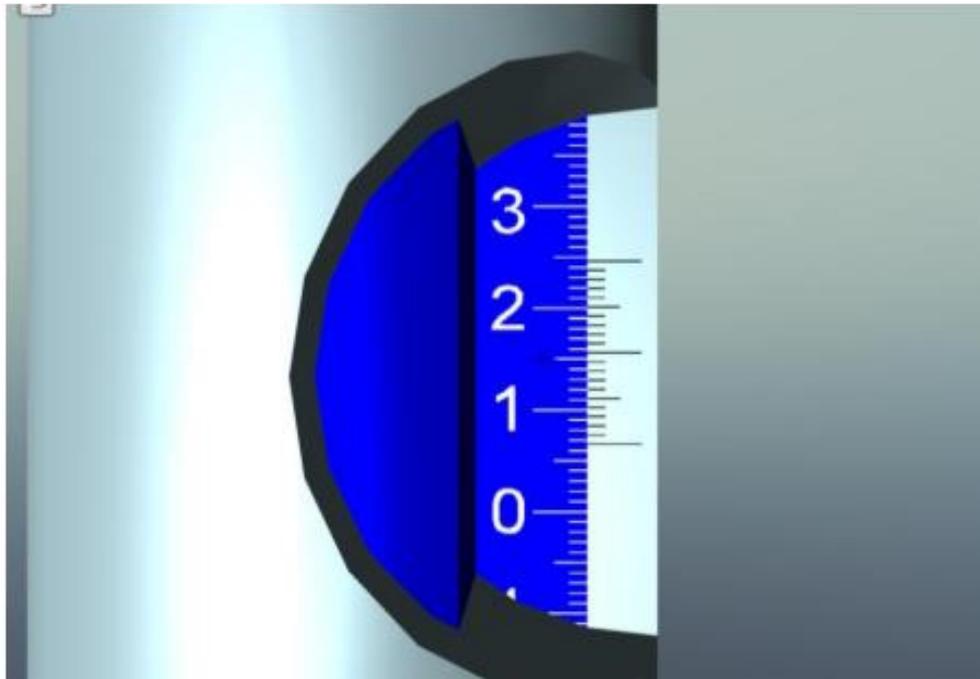


Рисунок 3.2 – Измерительная шкала угловой трубки полного напора

Трубка закреплена в державке, которая фиксируется в стержне цангой. Стержень перемещается радиально в корпусе координатника. Перемещения трубки отсчитывают по шкале на корпусе. Для повышения точности показаний установки трубки ограничитель снабжен нониусом.

Применяя трубки диаметром до 1 мм (внутренний диаметр 0,5 мм), можно проводить достоверные измерения на расстояниях от стенок в 2...3 мм. При меньших расстояниях возникают ошибки измерения из-за возрастания радиального градиента скорости и асимметрии обтекания трубки.

Для уменьшения влияния державки на поток ее диаметр не должен быть больше 0,05 диаметра мерного сечения. При установке прибора необходимо тщательно выверить пространственную ориентацию трубки и точно зафиксировать на шкале координатника начальное положение трубки в центре мерного сечения.

Пьезометры подключаются к кольцевому выравнивающему коллектору, соединенному в нескольких точках периметра с трубопроводом (рисунок 3.1). Дренажные отверстия в стенке должны иметь диаметр 1...4 мм и острые, тщательно зачищенные кромки, чтобы избежать появления местных деформаций потока, искажающих замеры.

При измерении больших скоростей воды, а также в трубах большого диаметра, на консоль угловой трубки действуют значительные гидродинамические силы, которые могут вызвать отклонения и вибрации трубки. В таких случаях целесообразно пользоваться цилиндрической трубкой полного напора (диаметр трубки $d = 3...5$ мм, диаметр входного отверстия – 0,5...1 мм), которая имеет две опоры, расположенные диаметрально. При этом замер давления нужно производить в сечении, вынесенном перед трубкой на 2...4 ее диаметра, чтобы исключить влияние стеснения потока трубкой на замер напора.

Перепад h_U полного и пьезометрического напоров измеряется прибором Пито – Прандтля. Если обнаруживаются значительные колебания показаний

пъезометра (вызываемые пульсациями потока), перед ним в соединительных линиях устанавливаются демпфирующие устройства в виде дросселей различного типа, усредняющих значения h_U .

Скорость в точке замера:

$$U = k\sqrt{2 \cdot g \cdot h_U}, \quad (1)$$

где k – тарировочный коэффициент трубки, обусловленный влиянием на показания конструкции трубки и числа Рейнольдса Re .

Для угловых трубок полного напора в обычных условиях измерений ($Re > 1000$) можно принимать $k = 1$.

Из-за большой инерционности прибора, измерения рассмотренным способом позволяют получать в турбулентном потоке только осредненные во времени значения местных скоростей. Измерения осредненных скоростей по осредненному прибором перепаду h_U связано с турбулентными пульсациями в потоке и возникающими от этого некоторыми погрешностями, которые, однако, невелики (менее 1 %).

Для измерения и контроля постоянства расхода на трубопроводе вне рабочего участка должно быть установлено расходомерное сужающее устройство (диафрагма и т. п.).

Чтобы обеспечить достаточную точность результатов, измерения скоростей следует производить в трубах диаметром не менее 50 мм.

Поскольку ни в реальных, ни в виртуальных условиях невозможно замерить скорость потока жидкости у стенки трубопровода (на расстоянии 5 см от осевой линии), скорость в данной точке условно принимается равной 40...60 % от скорости на оси трубопровода, что отображается в строке 4 таблицы 3.1.

Определение расхода воды в системе осуществляется с помощью ртутного дифференциального манометра, расположенного в правой части лабораторного стенда (рисунок 3.3).

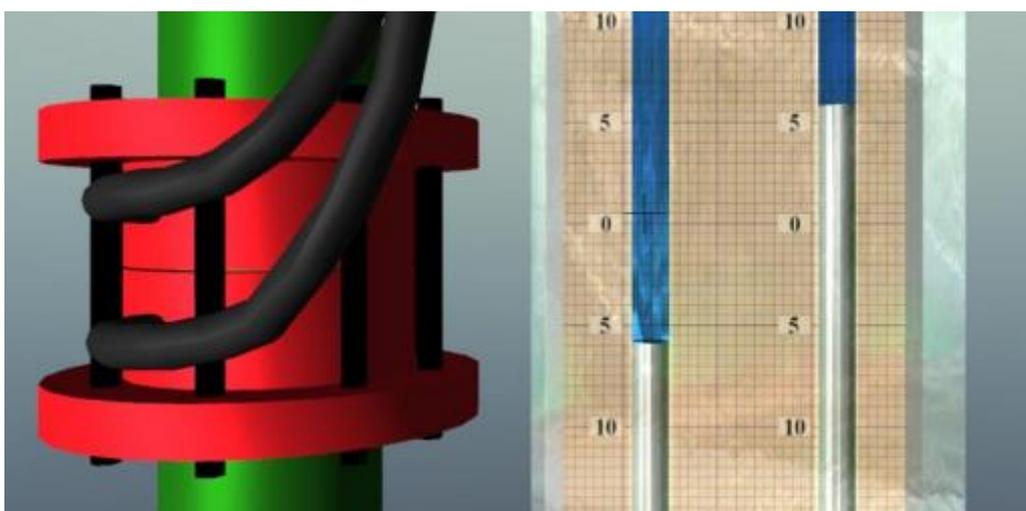


Рисунок 3.3 – Показания ртутного дифференциального манометра

Точное снятие показаний с измерительных шкал ртутного дифференциального манометра осуществляется путем наведения перекрестия (в центре экрана)

в центральную точку свободной поверхности жидкости измерительной трубки. Колебания отметки жидкости в стеклянной трубке должны осуществляться в обе стороны (вверх и вниз) от перекрестия. Расход по ртутному дифференциальному манометру определяется по формуле

$$Q_h = C\sqrt{h}, \quad (2)$$

где C – постоянная диафрагмы ($C = 0,7$);

h – перепад давлений по дифманометру, мм рт. ст.

3 Описание опытной установки

Симуляционная модель лабораторной установки (рисунок 3.4) включает центробежный насос (1) с электроприводом (2), для включения которого используется пульт (3). С помощью насоса вода подается в трубопровод с внутренним диаметром 100 мм, в начало которого установлен пружинный манометр (4) для измерения на выходе из насоса. Расход воды регулируется вентилем (5). Горизонтальная часть трубопровода выполнена из стекла (6). В конце данного участка установлено устройство для замера скоростного напора, объединяющее мерную диафрагму (7) и трубку Пито (8). К правому вертикальному участку трубопровода подключен ртутный дифференциальный манометр (9). В центральной части лабораторной установки расположена шкала прибора Пито – Прандтля (10) и компрессор (11) для подачи сжатого воздуха в верхнюю часть трубок прибора.

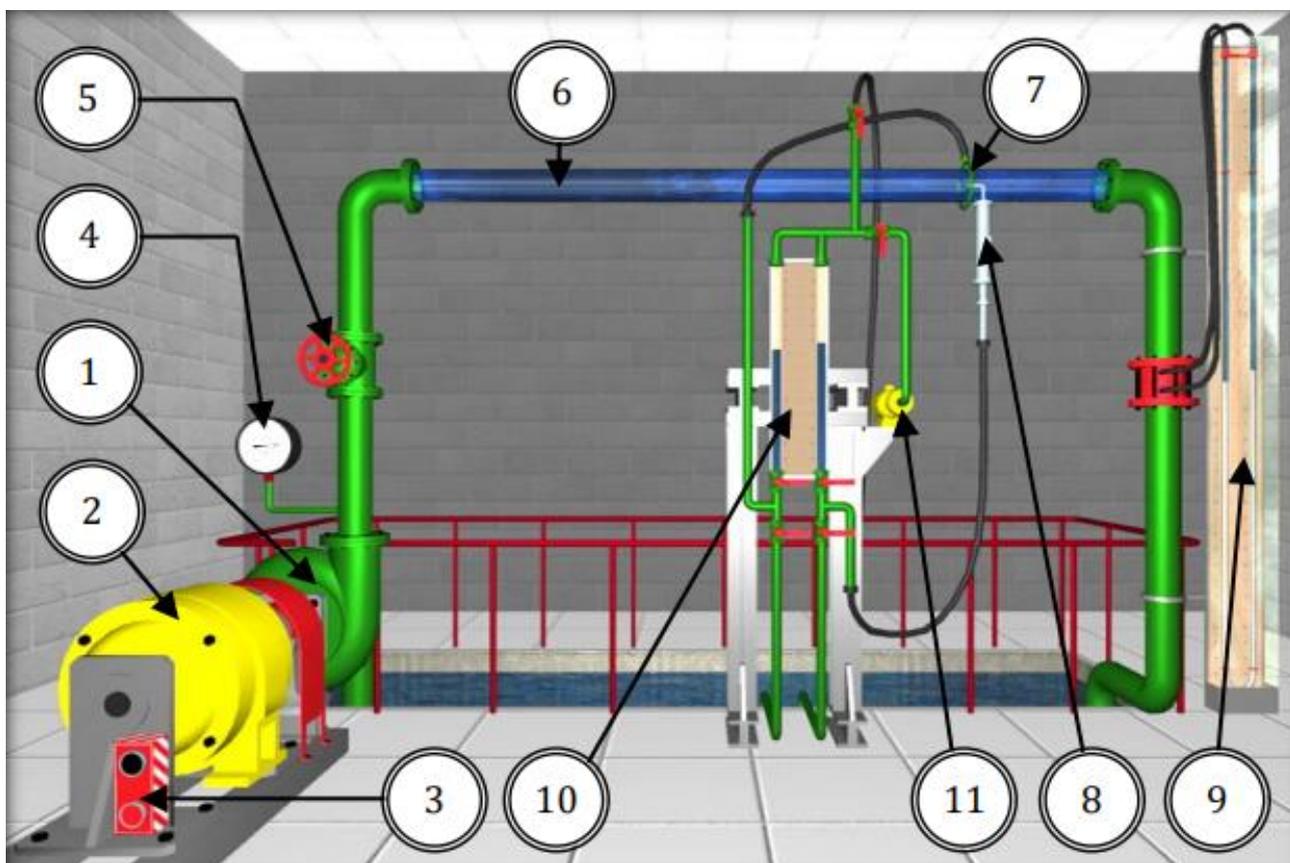


Рисунок 3.4 – Внешний вид симуляционной лабораторной установки

4 Порядок проведения работы

4.1. Включить установку и по заданию преподавателя установить расход воды с помощью вентиля изменения расхода.

4.2. Замерить показания прибора Пито – Прандтля в указанных в таблице 3.1 точках сечений и занести их в таблицу 3.1.

4.3. По формуле (1) определить скорости в данных точках и записать их в строку 4 таблицы 3.1.

4.4. Умножить полученные скорости на площади сечений, к которым относятся эти скорости (строка 6 таблицы 3.1), получить элементарные расходы, значения которых занести в строку 7 таблицы 3.1.

4.5. Сложить все расходы строки 7, получить общий расход сечения (строка 8 таблицы 3.1).

4.6. Оценить расход установки по дифференциальному манометру (строки 11–13 таблицы 3.1) и сравнить с расходом, определенным по эпюре скоростей (строка 8 таблицы 3.1).

4.7. Построить по опытным данным (в масштабе) эпюру скоростей для сечения.

4.8. Дать заключения по лабораторной работе.

5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

5.1. Цель работы.

5.2. Схему лабораторной установки.

5.3. Основные теоретические и расчетные формулы.

5.4. Таблицу с данными измерений и результатами расчетов.

5.5. Эпюру скоростей для сечения.

6 Вопросы для самопроверки

6.1. Чем обусловлен тарировочный коэффициент трубки?

6.2. Дайте определение понятию «число Рейнольдса».

6.3. Чем осуществляется определение расхода воды в системе?

6.4. Дайте определение понятию «скоростной напор».

6.5. Чем измеряется перепад h_U полного и пьезометрического напоров?

Таблица 3.1 – Результаты исследований по определению скоростей в сечении круглой трубы

№	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед.	Результаты измерений и вычислений												
			0	0,5	1	2	3	3,5	4	4,3	4,5	4,6	4,7	5	
1	Расстояние от центра трубы до точки замера скорости	см													
2	Показание прибора Пито – Прандтля в точке замера $h_{left} h_{right}$	мм													
3	Скоростная высота в точке замера $h_{Ui} = h_{left} + h_{right}$	мм													
4	Скорость в точке замера $U_i = \sqrt{2g \cdot h_{Ui}}$	м/с													
5	Средняя скорость по замеренным скоростям $v = \frac{\sum U_i}{12}$	м/с													
6	Площади кольцевых сечений в точках замера S_i	см ²	0,196	1,571	5,301	12,57	13,55	11,0	9,927	6,715	4,218	2,898	5,98	4,64	
7	Элементарные расходы по точкам замеров $q_i = U_i S_i$	м ³ /с													
8	Расход сечения $Q_q = \sum q_i$	м ³ /с													
9	Площадь сечения трубопровода диаметром $D = 100$ мм $S = \pi D^2/4$														
10	Средняя скорость $v_q = Q_q/S$	м/с													
11	Число Рейнольдса $Re = v_q d/\nu$														
12	Показание ртутного дифманометра для замера расхода, h	мм													
13	Расход $Q_h = C \cdot \sqrt{h}$, ($C = 0,7$)	л/с													
14	Расход Q_h	м ³ /с													
15	Средняя скорость $v_h = Q_h/S$	м/с													

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА

1 Цель работы

1.1. Определить по опытным данным, воспользовавшись формулами (1) и (4), значения коэффициента гидравлического трения λ_{exp} и величины коэффициентов местных сопротивлений ζ_{exp} для выбранных участков.

1.2. Установить области гидравлического сопротивления, в которых работают участки напорного трубопровода.

1.3. Вычислить значения коэффициентов гидравлического трения λ по соответствующим эмпирическим формулам.

1.4. Найти справочные значения коэффициентов местных сопротивлений.

1.5. Определить относительные отклонения λ_{exp} и ζ_{exp} от их расчетных (справочных) значений.

1.6. Построить по опытным данным (в масштабе) график напоров для участка, предложенного преподавателем.

2 Общие сведения

Экспериментальными исследованиями установлено, что при движении жидкости часть полного напора (энергии) затрачивается на преодоление работы сил вязкости, т. е. возникают потери напора.

При равномерном движении жидкости гидравлическое сопротивление, проявляющееся равномерно по всей длине потока, называют сопротивлением по длине, а вызываемые им потери напора – потерями напора по длине (h_l). Эти потери в круглых трубопроводах, работающих полным сечением, вычисляют по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l \cdot v^2}{d \cdot 2g}, \quad (1)$$

где λ – безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом гидравлического трения (коэффициентом Дарси). Величина коэффициента λ характеризует гидравлическое сопротивление трубопровода и зависит в общем случае от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости $\Delta E/d$ трубопровода, т. е. $\lambda = f(Re, \Delta E/d)$;

l и d – длина и внутренний диаметр трубопровода;

v – средняя скорость движения потока жидкости.

На рисунке 4.1 изображена зависимость коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re для труб с различной относительной искусственной шероховатостью $\Delta E/d$.

Величину коэффициента λ при гидравлических экспериментах вычисляют по опытным данным из формулы (1). При гидравлических же расчетах – по эмпирическим и полуэмпирическим формулам, например, при ламинарном режиме:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (2)$$

а при турбулентном режиме движения жидкости и работе трубопровода в области доквадратичного сопротивления – по формуле

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_E}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (3)$$

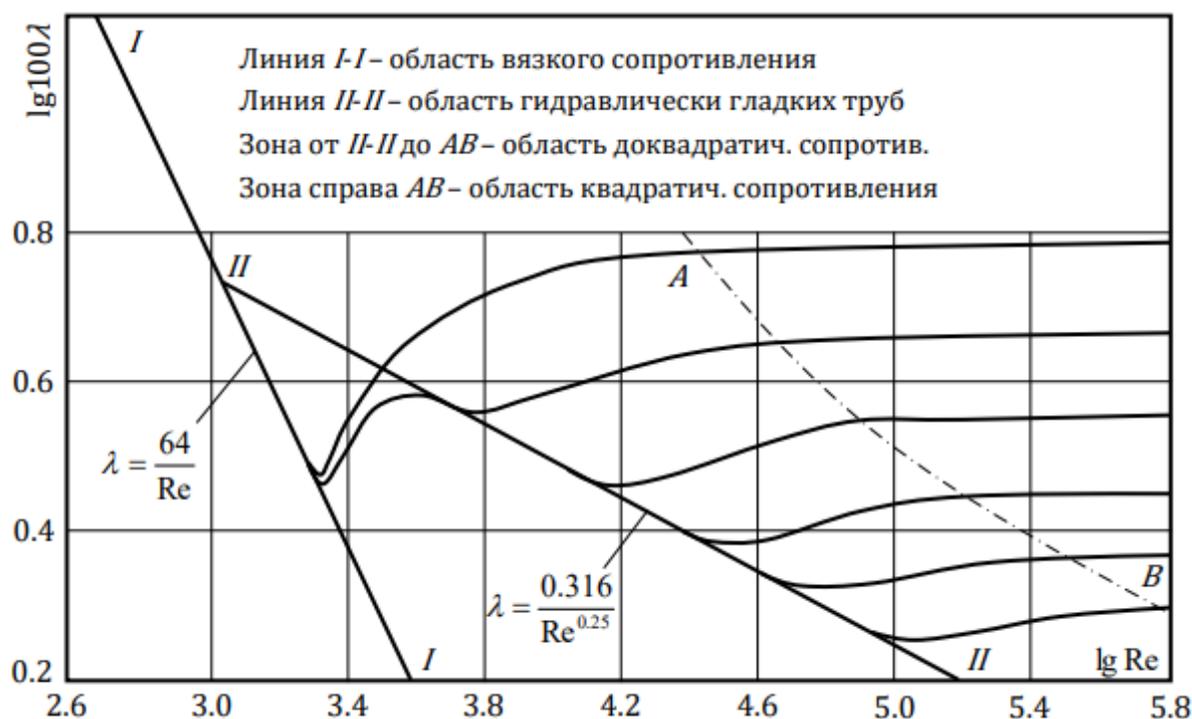


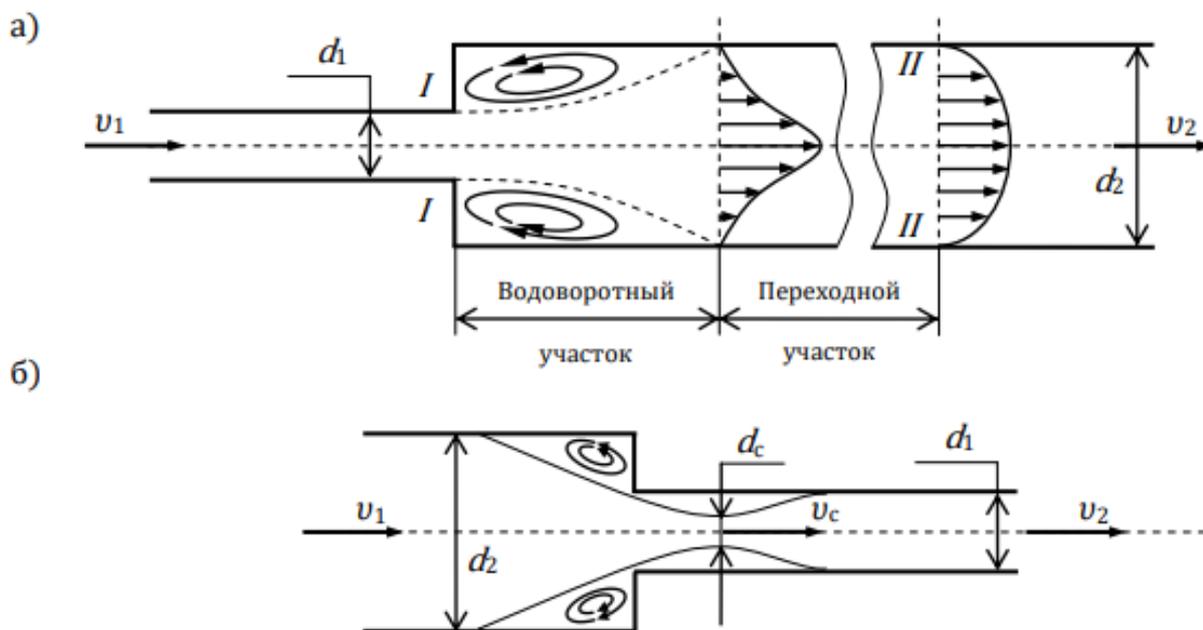
Рисунок 4.1 – Зависимость коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re для труб с различной искусственной шероховатостью

Величину абсолютной эквивалентной шероховатости Δ_E при расчетах берут из справочной литературы в зависимости от материала трубопровода и состояния его внутренней поверхности. Например, для труб из органического стекла $\Delta_E = 0,006$ мм, а для стальных водопроводных умеренно заржавленных труб $\Delta_E = 0,20 \dots 0,50$ мм.

Область гидравлического сопротивления при расчетах определяют или непосредственно по графикам $\lambda = f(Re, \Delta_E/d)$, полученным опытным путем для труб из различных материалов и приведенным в справочной литературе, или же с помощью соотношений $10 d/\Delta_E$ и $500 d/\Delta_E$. В последнем случае вычисляют соотношения $10 d/\Delta_E$ и $500 d/\Delta_E$ и сравнивают их с числом Рейнольдса $Re(d) = ud/\nu$. При этом, если $Re \geq 500 d/\Delta_E$, трубопровод работает в области квадратичного сопротивления. Если $3000 < Re \leq 10 d/\Delta_E$, трубопровод работает в области гидравлически гладких труб. Если же $10 d/\Delta_E < Re < 500 d/\Delta_E$, трубопровод работает в области доквадратичного сопротивления.

Следует иметь в виду, что для каждой области гидравлического сопротивления предложены и используются при гидравлических расчетах свои формулы для вычисления коэффициента λ .

Другой вид гидравлических сопротивлений, возникающих в местах резкого изменения конфигурации потока, изменения скорости потока по величине или направлению, называют местными сопротивлениями, а вызываемые ими потери напора – местными потерями напора (h_{loc}).



*а – резкое расширение; б – резкое сужение
 Рисунок 4.2 – Схемы движения жидкости
 при резком (внезапном) изменении сечения трубопровода*

При прохождении через любое местное сопротивление поток жидкости деформируется (рисунок 4.2), вследствие чего движение становится неравномерным, резко изменяющимся, для которого характерны:

- а) значительное искривление линий тока и живых сечений потока;
- б) отрывы транзитной струи от стенок трубопровода (ввиду действия закона инерции) и возникновение в местах отрыва устойчивых водоворотов;
- в) повышенная (по сравнению с равномерным движением) пульсация скоростей и давлений;
- г) изменение формы (переформирование) эпюр скоростей.

Местные потери напора при гидравлических расчетах вычисляют по формуле Вейсбаха

$$h_{loc} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

где ζ – безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом местного сопротивления;

v – средняя скорость потока в сечении за местным сопротивлением, т. е. ниже по течению (если скорость v как исключение принимается перед местным сопротивлением, это обязательно оговаривается).

Величина коэффициента ζ зависит в общем случае от числа Рейнольдса Re , вида и конфигурации, т. е. формы проточной части местного сопротивления.

В частном случае, когда трубопровод, на котором расположено местное сопротивление, работает в области квадратичного сопротивления, величина коэффициента ζ от Re не зависит.

Величину ζ для каждого вида местного сопротивления определяют по данным гидравлических экспериментов, пользуясь формулой (4). Полученные таким образом значения коэффициентов ζ для различных видов местных сопротивлений берутся при гидравлических расчетах (обычно при квадратичной области сопротивления) из справочной и специальной литературы. Исключением являются резкое расширение и резкое сужение трубопровода, для которых численные значения коэффициентов ζ определяются по формулам, полученным теоретическим и полуэмпирическим путем. При резком расширении трубопровода, когда средняя скорость в формуле (4) взята перед местным сопротивлением, т. е. v_1 , коэффициент местного сопротивления для резкого расширения

$$\zeta'_{exp} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2. \quad (5)$$

Если же скорость берется за местным сопротивлением, т. е. v_2 , то

$$\zeta''_{exp} = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2, \quad (6)$$

где S_1 и S_2 – площади проходных сечений трубопровода до и после местного сопротивления по направлению движения жидкости соответственно.

Коэффициент местного сопротивления при резком сужении трубопровода (ζ_{nar}) принято относить к скорости после сужения. При этом

$$\zeta_{nar} = 0,5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)^2. \quad (7)$$

3 Описание опытной установки

Симуляционная модель лабораторной установки (рисунок 4.3) включает питающий резервуар (1), в который осуществляется подача воды по трубопроводу (2). Внутри резервуара предусмотрено переливное устройство, обеспечивающее установившееся движение в системе. При этом отвод воды из правой части резервуара осуществляется через трубопровод (3). Для включения подачи воды используется кран (4). Из левой части резервуара вода подается в напорный трубопровод (5) с последовательно расположенными на нем гидравлическими сопротивлениями (по длине и местными). К каждому гидравлическому сопротивлению подключено по два пьезометра (перед ним и за ним). Все пьезометры для удобства работы выведены на стенд (6). Для регулирования расхода воды Q в системе служит вентиль (7). Величина Q измеряется с помощью мерного бака (8) и секундомера.

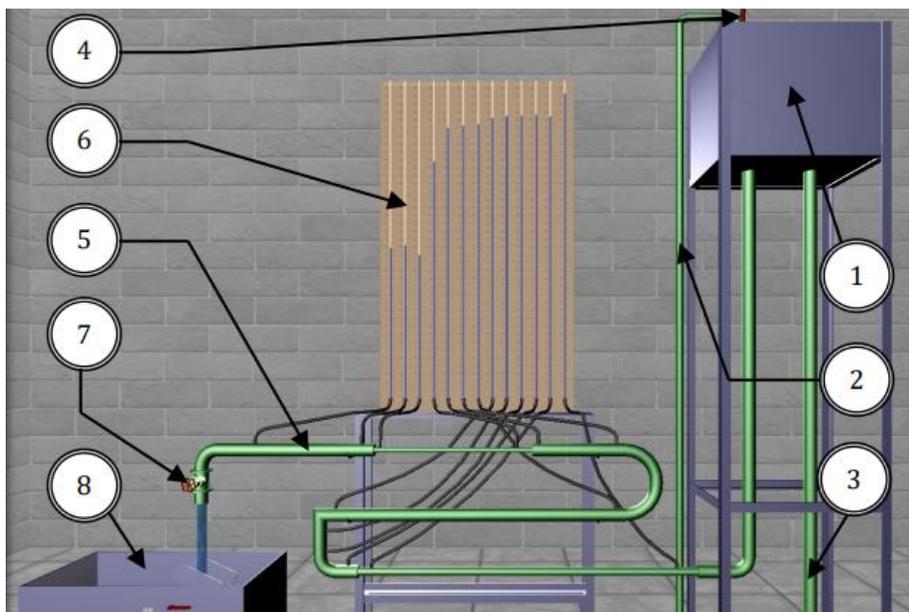


Рисунок 4.3 – Внешний вид симуляционной лабораторной установки

Установка позволяет провести необходимые замеры и определить коэффициенты гидравлического трения λ и коэффициенты местных сопротивлений ζ для следующих участков (p_i – пьезометр в начале участка, p_{i+1} – пьезометр в конце участка):

$p_1 - p_2$ – прямой участок для определения потерь напора по длине и вычисления коэффициента гидравлического трения λ ;

$p_2 - p_3$ – резкое расширение для определения потерь напора на местном сопротивлении и вычисления коэффициента местного сопротивления ζ ;

$p_3 - p_4$ – плавный поворот для определения потерь напора на местном сопротивлении и вычисления коэффициента местного сопротивления ζ ;

$p_4 - p_5$ – прямой участок для определения потерь напора по длине и вычисления коэффициента гидравлического трения λ ;

$p_5 - p_6$ – резкий поворот для определения потерь напора на местном сопротивлении и вычисления коэффициента местного сопротивления ζ ;

$p_6 - p_7$ – прямой участок для определения потерь напора по длине и вычисления коэффициента гидравлического трения λ ;

$p_7 - p_8$ – плавный поворот для определения потерь напора на местном сопротивлении и вычисления коэффициента местного сопротивления ζ ;

$p_8 - p_9$ – прямой участок для определения потерь напора по длине и вычисления коэффициента гидравлического трения λ ;

$p_9 - p_{10}$ – резкое сужение для определения потерь напора на местном сопротивлении и вычисления коэффициента местного сопротивления ζ ;

$p_{10} - p_{11}$ – прямой участок для определения потерь напора по длине и вычисления коэффициента гидравлического трения λ ;

$p_{11} - p_{12}$ – резкое расширение для определения потерь напора на местном сопротивлении и вычисления коэффициента местного сопротивления ζ ;

$p_{12} - p_{13}$ – прямой участок для определения потерь напора по длине и вычисления коэффициента гидравлического трения λ .

Геометрические размеры участков трубопровода представлены на рисунке 4.4.

$d_1=50$ мм
 $d_2=40$ мм
 $d_3=50$ мм
 $d_4=25$ мм
 $d_5=50$ мм
 Вязкость жидкости:
 $\nu=0.0101$ см²/с
 Экв. шероховатость:
 $\Delta_E=0.1$ мм

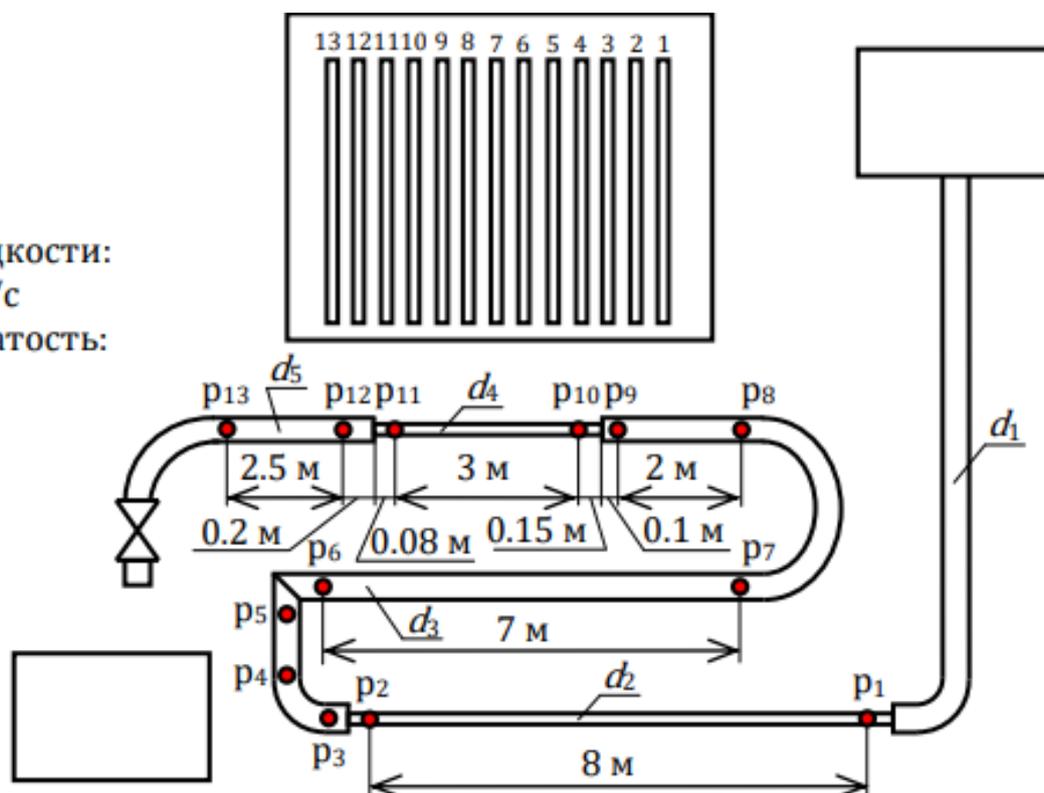


Рисунок 4.4 – Геометрические размеры лабораторной установки

4 Порядок проведения работы

4.1. Открыть питающую задвижку и наполнить установку водой.

4.2. После наполнения водой резервуара и стабилизации уровня воды в нем (переливное устройство должно при этом работать) следует открытием регулирующего вентиля подать воду в систему трубопроводов.

4.3. По секундомеру определить время t (с) наполнения мерного бака объемом $W = 0,05$ м³.

4.4. Определить расход воды $Q = W/t$ (м³/с).

4.5. Измерить отметки уровней воды в пьезометрах, а также ее температуру (термометром в питающем резервуаре).

4.6. Определить кинематический коэффициент вязкости воды ν .

4.7. Результаты измерений для одного опыта (при одном расходе воды) записать в таблицы 4.1–4.7 (в зависимости от задания преподавателя и выбранного участка).

Произвести обработку опытных данных в таблицах 4.1–4.7.

Построить по опытным данным (в масштабе) график напоров для участка, предложенного преподавателем.

Дать заключения по лабораторной работе.

Таблица 4.1 – Результаты исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ_{ex} и величины коэффициента местного сопротивления ζ_{ex} для участков трубопровода

№ п/п	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			Сопротивления по длине				Местные сопротивления					
			Уч. 12–13		Уч. 1–2		Резкий поворот		Плавный поворот		Резкое сужение	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	Номера сечений	–	12	13	1	2	5	6	7	8	9	10
2	Показания пьезометров $z_i + p_i / \rho g$ (с точностью до мм)	м										
3	Объем мерного бака W	м ³										
4	Время наполнения бака t	с										
5	Расход Q	м ³ /с										
6	Диаметр сечения трубы d_i	м										
7	Площадь поперечного сечения трубы $S_i = \pi d_i^2 / 4$	м ²										
8	Средняя скорость потока $v_i = Q / S_i$	м/с										
9	Скоростной напор $v_i^2 / 2g$	м										
10	Полные напоры в сечениях $z_i + p_i / \rho g + v_i^2 / 2g$	м										
11	Потери напора по длине h_{li} и местные h_{loci} (по разности полных напоров перед и за сопротивлением)	м										
12	Расстояния между точками подключения пьезометров (длины участков) l_i	м										
13	Коэффициент гидравлического трения по опытным данным $\lambda_{expi} = (h_{li} d_i / l_i) / (v_i^2 / 2g)$	–										
14	Коэффициент местного сопротивления по опытным данным $\zeta_{expi} = h_{loci} / (v_i^2 / 2g)$	–										
15	Число Рейнольдса $Re = v_i d_i / \nu$	–										
16	Область гидравлического сопротивления (гладких труб, докватратичная, квадратичная)	–										
17	Коэффициент гидравлического трения λ_i по эмпирическим формулам	–										
18	Коэффициент местного сопротивления ζ_i (по справочнику и эмпирическим формулам)	–										
19	Относительные отклонения E_λ и E_ζ	$E_\lambda = (\lambda - \lambda_{ex} / \lambda) \cdot 100$	%									
		$E_\zeta = (\zeta - \zeta_{ex} / \zeta) \cdot 100$	%									

Таблица 4.2 – Результаты исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ_{exp} и величины коэффициента местного сопротивления ζ_{exp} для участков трубопровода

№ п/п	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			Сопротивления по длине				Местные сопротивления					
			Уч. 1–2		Уч. 6–7		Резкий поворот		Плавный поворот		Резкое расширение	
1	2	6	7	5	6	3	4	11	12			
1	Номера сечений	–										
2	Показания пьезометров $z_i + p_i/\rho g$ (с точностью до мм)	м										
3	Объем мерного бака W	м ³										
4	Время наполнения бака t	с										
5	Расход Q	м ³ /с										
6	Диаметр сечения трубы d_i	м										
7	Площадь поперечного сечения трубы $S_i = \pi d_i^2/4$	м ²										
8	Средняя скорость потока $v_i = Q/S_i$	м/с										
9	Скоростной напор $v_i^2/2g$	м										
10	Полные напоры в сечениях $z_i + p_i/\rho g + v_i^2/2g$	м										
11	Потери напора по длине h_{li} и местные h_{loci} (по разности полных напоров перед и за сопротивлением)	м										
12	Расстояния между точками подключения пьезометров (длины участков) l_i	м										
13	Коэффициент гидравлического трения по опытным данным $\lambda_{\text{exp}} = (h_{li} d_i / l_i) / (v_i^2 / 2g)$	–										
14	Коэффициент местного сопротивления по опытным данным $\zeta_{\text{exp}} = h_{loci} / (v_i^2 / 2g)$	–										
15	Число Рейнольдса $Re = v_i d_i / \nu$	–										
16	Область гидравлического сопротивления (гладких труб, докватратичная, квадратичная)	–										
17	Коэффициент гидравлического трения λ по эмпирическим формулам	–										
18	Коэффициент местного сопротивления ζ_i (по справочнику и эмпирическим формулам)	–										
19	Относительные отклонения E_λ и E_ζ	$E_\lambda = (\lambda - \lambda_{\text{exp}} / \lambda) \cdot 100$	%									
		$E_\zeta = (\zeta - \zeta_{\text{exp}} / \zeta) \cdot 100$	%									

Таблица 4.3 – Результаты исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ_{exp} и величины коэффициента местного сопротивления ζ_{exp} для участков трубопровода

№ п/п	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			Сопротивления по длине				Местные сопротивления					
			Уч. 10–11		Уч. 6–7		Резкий поворот		Плавный поворот		Резкое расширение	
10	11	6	7	5	6	7	8	11	12			
1	Номера сечений	–										
2	Показания пьезометров $z_i + p_i / \rho g$ (с точностью до мм)	м										
3	Объем мерного бака W	м ³										
4	Время наполнения бака t	с										
5	Расход Q	м ³ /с										
6	Диаметр сечения трубы d_i	м										
7	Площадь поперечного сечения трубы $S_i = \pi d_i^2 / 4$	м ²										
8	Средняя скорость потока $v_i = Q / S_i$	м/с										
9	Скоростной напор $v_i^2 / 2g$	м										
10	Полные напоры в сечениях $z_i + p_i / \rho g + v_i^2 / 2g$	м										
11	Потери напора по длине h_{li} и местные h_{loci} (по разности полных напоров перед и за сопротивлением)	м										
12	Расстояния между точками подключения пьезометров (длины участков) l_i	м										
13	Коэффициент гидравлического трения по опытным данным $\lambda_{\text{exp}} = (h_{li} d_i / l_i) / (v_i^2 / 2g)$	–										
14	Коэффициент местного сопротивления по опытным данным $\zeta_{\text{exp}} = h_{loci} / (v_i^2 / 2g)$	–										
15	Число Рейнольдса $Re = v_i d_i / \nu$	–										
16	Область гидравлического сопротивления (гладких труб, докватратичная, квадратичная)	–										
17	Коэффициент гидравлического трения λ по эмпирическим формулам	–										
18	Коэффициент местного сопротивления ζ_i (по справочнику и эмпирическим формулам)	–										
19	Относительные отклонения E_λ и E_ζ	$E_\lambda = (\lambda - \lambda_{\text{exp}} / \lambda) \cdot 100$										
		$E_\zeta = (\zeta - \zeta_{\text{exp}} / \zeta) \cdot 100$										

Таблица 4.4 – Результаты исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ_{exp} и величины коэффициента местного сопротивления ζ_{exp} для участков трубопровода

№ п/п	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			Сопротивления по длине				Местные сопротивления					
			Уч. 1–2		Уч. 6–7		Резкое сужение		Плавный поворот		Резкое расширение	
1	2	6	7	9	10	3	4	11	12			
1	Номера сечений	–										
2	Показания пьезометров $z_i + p_i/\rho g$ (с точностью до мм)	м										
3	Объем мерного бака W	м ³										
4	Время наполнения бака t	с										
5	Расход Q	м ³ /с										
6	Диаметр сечения трубы d_i	м										
7	Площадь поперечного сечения трубы $S_i = \pi d_i^2/4$	м ²										
8	Средняя скорость потока $v_i = Q/S_i$	м/с										
9	Скоростной напор $v_i^2/2g$	м										
10	Полные напоры в сечениях $z_i + p_i/\rho g + v_i^2/2g$	м										
11	Потери напора по длине h_{li} и местные h_{loci} (по разности полных напоров перед и за сопротивлением)	м										
12	Расстояния между точками подключения пьезометров (длины участков) l_i	м										
13	Коэффициент гидравлического трения по опытным данным $\lambda_{\text{exp}} = (h_{li} d_i / l_i) / (v_i^2/2g)$	–										
14	Коэффициент местного сопротивления по опытным данным $\zeta_{\text{exp}} = h_{loci} / (v_i^2/2g)$	–										
15	Число Рейнольдса $Re = v_i d_i / \nu$	–										
16	Область гидравлического сопротивления (гладких труб, докватратичная, квадратичная)	–										
17	Коэффициент гидравлического трения λ по эмпирическим формулам	–										
18	Коэффициент местного сопротивления ζ_i (по справочнику и эмпирическим формулам)	–										
19	Относительные отклонения E_λ и E_ζ	$E_\lambda = (\lambda - \lambda_{\text{exp}} / \lambda) \cdot 100$	%									
		$E_\zeta = (\zeta - \zeta_{\text{exp}} / \zeta) \cdot 100$	%									

Таблица 4.5 – Результаты исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ_{exp} и величины коэффициента местного сопротивления ζ_{exp} для участков трубопровода

№ п/п	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			Сопротивления по длине				Местные сопротивления					
			Уч. 10–11		Уч. 6–7		Резкий поворот		Плавный поворот		Резкое расширение	
10	11	6	7	5	6	3	4	11	12			
1	Номера сечений	–										
2	Показания пьезометров $z_i + p_i/\rho g$ (с точностью до мм)	м										
3	Объем мерного бака W	м ³										
4	Время наполнения бака t	с										
5	Расход Q	м ³ /с										
6	Диаметр сечения трубы d_i	м										
7	Площадь поперечного сечения трубы $S_i = \pi d_i^2/4$	м ²										
8	Средняя скорость потока $v_i = Q/S_i$	м/с										
9	Скоростной напор $v_i^2/2g$	м										
10	Полные напоры в сечениях $z_i + p_i/\rho g + v_i^2/2g$	м										
11	Потери напора по длине h_{li} и местные h_{loci} (по разности полных напоров перед и за сопротивлением)	м										
12	Расстояния между точками подключения пьезометров (длины участков) l_i	м										
13	Коэффициент гидравлического трения по опытным данным $\lambda_{\text{exp}} = (h_{li} d_i / l_i) / (v_i^2/2g)$	–										
14	Коэффициент местного сопротивления по опытным данным $\zeta_{\text{exp}} = h_{loci} / (v_i^2/2g)$	–										
15	Число Рейнольдса $Re = v_i d_i / \nu$	–										
16	Область гидравлического сопротивления (гладких труб, доквадратичная, квадратичная)	–										
17	Коэффициент гидравлического трения λ по эмпирическим формулам	–										
18	Коэффициент местного сопротивления ζ_i (по справочнику и эмпирическим формулам)	–										
19	Относительные отклонения E_λ и E_ζ	$E_\lambda = (\lambda - \lambda_{\text{exp}} / \lambda) \cdot 100$										
		$E_\zeta = (\zeta - \zeta_{\text{exp}} / \zeta) \cdot 100$										

Таблица 4.6 – Результаты исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ_{exp} и величины коэффициента местного сопротивления ζ_{exp} для участков трубопровода

№ п/п	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений										
			Сопротивления по длине				Местные сопротивления						
			Уч. 12–13		Уч. 1–2		Резкий поворот		Плавный поворот		Резкое сужение		
12	13	1	2	5	6	7	8	9	10				
1	Номера сечений	–											
2	Показания пьезометров $z_i + p_i / \rho g$ (с точностью до мм)	м											
3	Объем мерного бака W	м ³											
4	Время наполнения бака t	с											
5	Расход Q	м ³ /с											
6	Диаметр сечения трубы d_i	м											
7	Площадь поперечного сечения трубы $S_i = \pi d_i^2 / 4$	м ²											
8	Средняя скорость потока $v_i = Q / S_i$	м/с											
9	Скоростной напор $v_i^2 / 2g$	м											
10	Полные напоры в сечениях $z_i + p_i / \rho g + v_i^2 / 2g$	м											
11	Потери напора по длине h_{li} и местные h_{loci} (по разности полных напоров перед и за сопротивлением)	м											
12	Расстояния между точками подключения пьезометров (длины участков) l_i	м											
13	Коэффициент гидравлического трения по опытным данным $\lambda_{\text{exp}} = (h_{li} d_i / l_i) / (v_i^2 / 2g)$	–											
14	Коэффициент местного сопротивления по опытным данным $\zeta_{\text{exp}} = h_{loci} / (v_i^2 / 2g)$	–											
15	Число Рейнольдса $Re = v_i d_i / \nu$	–											
16	Область гидравлического сопротивления (гладких труб, докватратичная, квадратичная)	–											
17	Коэффициент гидравлического трения λ по эмпирическим формулам	–											
18	Коэффициент местного сопротивления ζ_i (по справочнику и эмпирическим формулам)	–											
19	Относительные отклонения E_λ и E_ζ	$E_\lambda = (\lambda - \lambda_{\text{exp}} / \lambda) \cdot 100$	%										
		$E_\zeta = (\zeta - \zeta_{\text{exp}} / \zeta) \cdot 100$	%										

Таблица 4.7 – Результаты исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ_{exp} и величины коэффициента местного сопротивления ζ_{exp} для участков трубопровода

№ п/п	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			Сопротивления по длине						Местные сопротивления			
			Уч. 8–9		Уч. 10–11		Уч. 12–13		Резкое сужение		Резкое расширение	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Номера сечений	–	8	9	10	11	12	13	9	10	11	12
2	Показания пьезометров $z_i + p_i / \rho g$ (с точностью до мм)	м										
3	Объем мерного бака W	м ³										
4	Время наполнения бака t	с										
5	Расход Q	м ³ /с										
6	Диаметр сечения трубы d_i	м										
7	Площадь поперечного сечения трубы $S_i = \pi d_i^2 / 4$	м ²										
8	Средняя скорость потока $v_i = Q / S_i$	м/с										
9	Скоростной напор $v_i^2 / 2g$	м										
10	Полные напоры в сечениях $z_i + p_i / \rho g + v_i^2 / 2g$	м										
11	Потери напора по длине h_{li} и местные h_{loci} (по разности полных напоров перед и за сопротивлением)	м										
12	Расстояния между точками подключения пьезометров (длины участков) l_i	м										
13	Коэффициент гидравлического трения по опытным данным $\lambda_{\text{exp}} = (h_{li} d_i / l_i) / (v_i^2 / 2g)$	–										
14	Коэффициент местного сопротивления по опытным данным $\zeta_{\text{exp}} = h_{loci} / (v_i^2 / 2g)$	–										
15	Число Рейнольдса $Re = v_i d_i / \nu$	–										
16	Область гидравлического сопротивления (гладких труб, докватричная, квадратичная)	–										
17	Коэффициент гидравлического трения λ по эмпирическим формулам	–										
18	Коэффициент местного сопротивления ζ_i (по справочнику и эмпирическим формулам)	–										
19	Относительные отклонения E_λ и E_ζ	$E_\lambda = (\lambda - \lambda_{\text{exp}} / \lambda) \cdot 100$	%									
		$E_\zeta = (\zeta - \zeta_{\text{exp}} / \zeta) \cdot 100$	%									

5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Схему лабораторной установки.
- 5.3. Основные теоретические и расчетные формулы.
- 5.4. Таблицу с данными измерений и результатами расчетов.
- 5.5. График напоров для заданного участка.

6 Вопросы для самопроверки

- 6.1. Напишите и поясните формулы Дарси – Вейсбаха и Вейсбаха.
- 6.2. Как опытным путем определяют величины коэффициентов λ и ζ ?
- 6.3. Что характеризуют коэффициенты λ и ζ , от каких факторов в общем случае они зависят и как их определяют при гидравлических расчетах?
- 6.4. Объясните, что такое Δ_s и Δ_s/d , как найти величину Δ_s при гидравлических расчетах?
- 6.5. Назовите области гидравлического сопротивления трубопроводов и объясните, как определяют область сопротивления при гидравлических расчетах.
- 6.6. Изобразите схемы движения жидкости при резком повороте трубы на 90° , а также при резком расширении и резком сужении трубопровода и дайте пояснения к ним, указав, что характерно для движения потока при протекании его через любое местное сопротивление.
- 6.7. Изобразите схему графика Никурадзе и дайте пояснения.
- 6.8. Поясните понятия «гидравлически гладкая труба» и «шероховатая труба».
- 6.9. Назовите факторы, обуславливающие повышение потери напора при прохождении потока жидкости через местные сопротивления.
- 6.10. Докажите, воспользовавшись формулами Дарси – Вейсбаха и Блазиуса, что при работе трубопроводов в области гидравлически гладких труб $h_l = f(v^{1,75})$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ В АТМОСФЕРУ

1 Цель работы

1.1. Определить по опытным данным величины коэффициентов μ_{exp} , φ_{exp} , ε_{exp} , ζ_{exp} при истечении воды через малое круглое отверстие диаметром $d = 20$ мм при постоянном напоре в атмосферу; величины коэффициентов μ_{Nexp} , φ_{Nexp} и ζ_{Nexp} для внешнего цилиндрического и конических (сходящегося и расходящегося) насадков при $H = const$.

1.2. Сравнить значения коэффициентов, полученные в опытах, со справочными и подсчитать относительные отклонения.

2 Общие сведения

Малым считается отверстие, линейный размер которого не превышает $0,1 H$ (рисунок 5.1), где H – превышение свободной поверхности жидкости над центром тяжести отверстия.

Стенку считают тонкой, если ее толщина $\delta > (1,5...3,0)d$ (рисунок 5.1). При выполнении этого условия величина δ не влияет на характер истечения жидкости из отверстия, так как вытекающая струя жидкости касается только острой кромки отверстия.

Гидростатическим давлением p называют нормальное сжимающее напряжение, возникающее в покоящейся жидкости под действием поверхностных и массовых сил.

Поскольку частицы жидкости движутся к отверстию по криволинейным траекториям, то за счет сил инерции струя, вытекающая из отверстия, сжимается. Благодаря действию сил инерции струя продолжает сжиматься и после выхода из отверстия. Наибольшее сжатие струи, как показывают опыты, наблюдается в сечении С-С на расстоянии примерно $(0,5...1,0) d$ от входной кромки отверстия (рисунок 5.1). Это сечение называют сжатым. Степень сжатия струи в этом сечении оценивают величиной коэффициента сжатия ε :

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (1)$$

где ω_c и ω – площадь сжатого живого сечения струи и площадь отверстия соответственно.

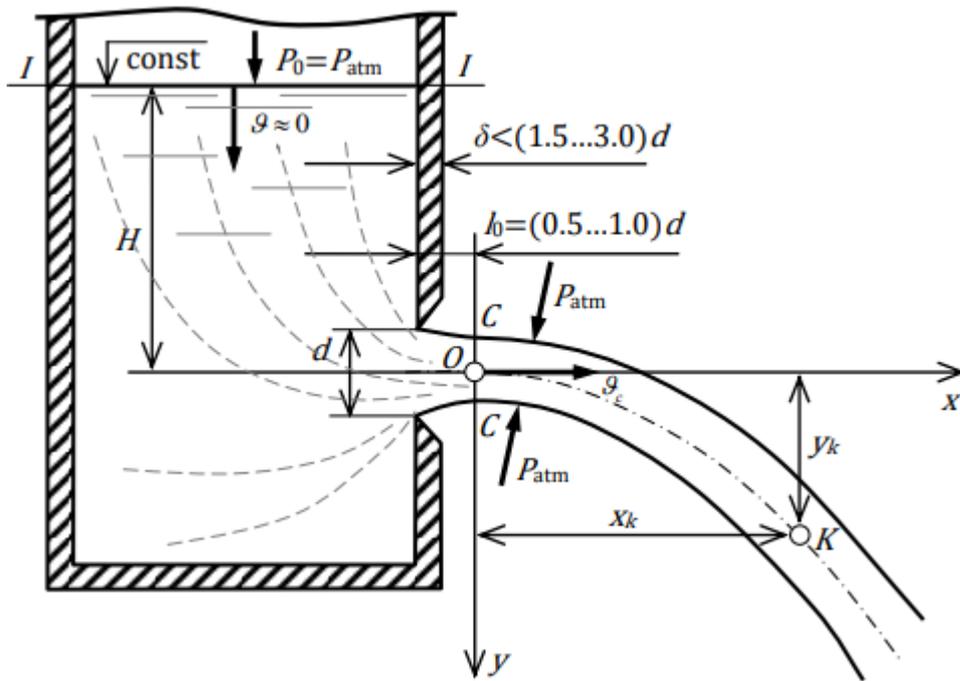


Рисунок 5.1 – Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке в атмосферу

Среднюю скорость струи v_c в сжатом сечении С-С при $p_0 = p_{atm}$ вычисляют по формуле, полученной из уравнения Д. Бернулли, составленного для сечений I-I и С-С (рисунок 5.1):

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

где φ – коэффициент скорости отверстия, определяемый по формуле

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}}. \quad (3)$$

На основании уравнения траектории струи, вытекающей из отверстия, было получено другое выражение для коэффициента φ :

$$\varphi = \frac{x_i}{2\sqrt{y_i H}}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4), α – коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), ζ – коэффициент местного сопротивления отверстия, x_i и y_i – координаты произвольно выбранной точки траектории струи.

Поскольку напор теряется главным образом вблизи отверстия, где скорости достаточно велики, при истечении из отверстия во внимание принимают только местные потери напора.

Расход жидкости Q через отверстие вычисляют так:

$$Q = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot h}, \quad (5)$$

где

$$\varphi \cdot \varepsilon = \mu. \quad (6)$$

Здесь μ – коэффициент расхода отверстия, учитывающий влияние гидравлического сопротивления и сжатия струи на расход жидкости. С учетом выражения для μ , формула (5) принимает вид:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot h} . \quad (7)$$

Величины коэффициентов ε , ζ , φ , μ для отверстий определяют опытным путем. Однако при больших числах Рейнольдса ($Re \geq 10^5$) указанные коэффициенты от Re и для круглых и квадратных отверстий при совершенном сжатии струи равны: $\varepsilon = 0,62 \dots 0,64$, $\zeta = 0,06$, $\varphi = 0,97 \dots 0,98$, $\mu = 0,60 \dots 0,62$.

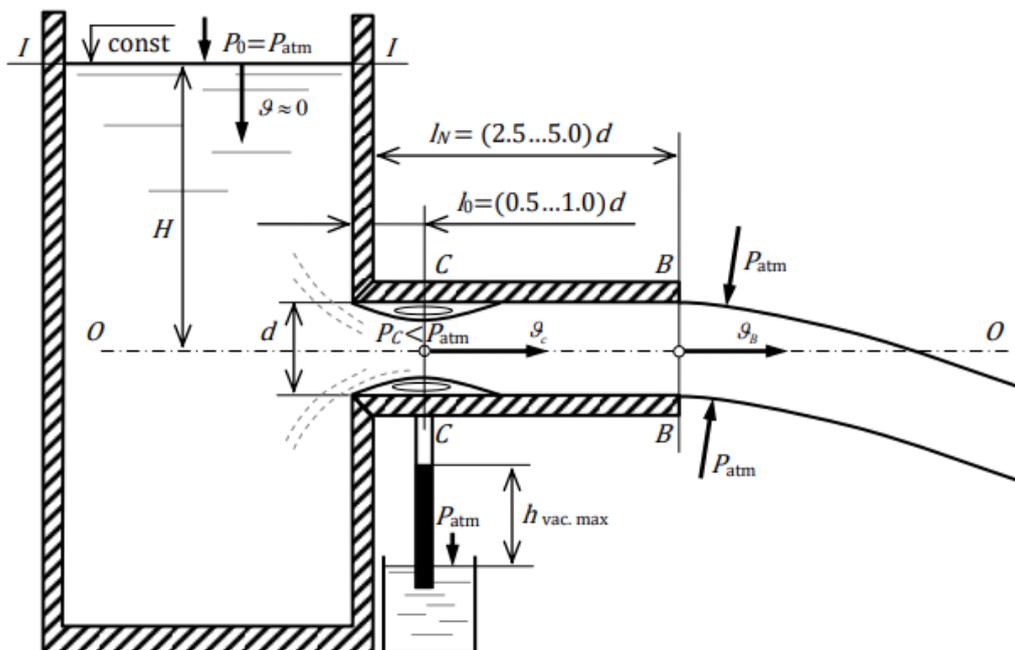


Рисунок 5.2 – Истечение жидкости из внешнего цилиндрического насадка в атмосферу

Насадком называют патрубок длиной $2,5d \leq L_N \leq 5d$ (рисунок 5.2), присоединенный к малому отверстию в тонкой стенке с целью изменения гидравлических характеристик истечения (скорости, расхода жидкости, траектории струи).

Насадки бывают цилиндрические (внешние и внутренние), конические (сходящиеся и расходящиеся) и коноидальные, т. е. очерченные по форме струи, вытекающей из отверстия.

Использование насадка любого типа вызывает увеличение расхода жидкости Q благодаря вакууму, возникающему внутри насадка в области сжатого сечения C-C (рисунок 5.2) и обуславливающему повышение напора истечения.

Среднюю скорость истечения жидкости из насадка ϑ и расход Q определяют по формулам, полученным из уравнения Д. Бернулли, записываемого для сечений I-I и B-B (Рисунок 5.2):

$$\vartheta = \varphi_N \cdot \sqrt{2g \cdot H} , \quad (8)$$

где $\varphi_N = 1/\sqrt{\alpha + \zeta_N}$ – коэффициент скорости насадка;

ζ_N – коэффициент сопротивления насадка.

Для выходного сечения В-В, коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 1$, так как насадок здесь работает полным сечением. Поэтому коэффициент расхода насадка $\mu_N = \varphi_N$. Расход жидкости, вытекающей из насадка, вычисляется по формуле, аналогичной формуле (7):

$$Q = \mu_N \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot H}. \quad (9)$$

3 Описание опытной установки

Симуляционная модель лабораторной установки (рисунок 5.3) включает напорный бак (1), на боковой поверхности которого имеется отверстие, перекрываемое рычажным клапаном (2). Перед отверстием (с внешней стороны бака) установлена вращающаяся турель (3) с круглым отверстием и насадками различных типов. Поворачивая турель, можно установить (напротив отверстия в стенке бака) насадки нужного типа или круглое отверстие. Вода в резервуар подается путем открытия вентиля (4). Напорный бак оснащен переливным устройством для поддержания постоянного уровня воды во время экспериментов.

Для определения напора истечения H резервуар снабжен водомерной трубкой со шкалой (5), ноль которой выровнен с центром отверстия. Расход воды на выходе из отверстий и насадок измеряется с помощью передвижного мерного бака (6) и секундомера. Координаты x и y произвольных точек траектории струи измеряются с помощью координатной сетки, нанесенной на экран (7).

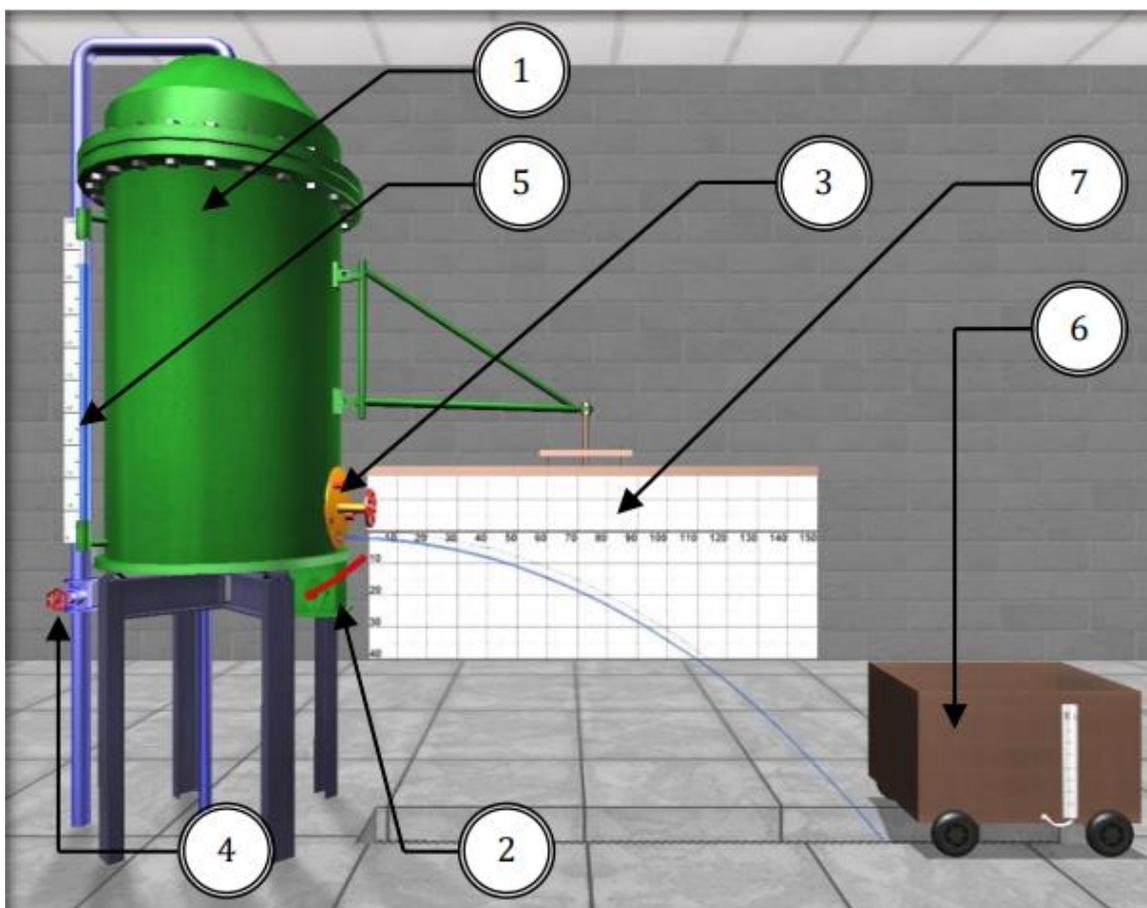


Рисунок 5.3 – Внешний вид симуляционной лабораторной установки

4 Порядок проведения работы

- 4.1. При закрытом вентиле изменения расхода залить водой всасывающий трубопровод и насос, а затем включить насос с пульта включения электропитания.
- 4.2. Открыть задвижку, заполнить водой резервуар настолько, чтобы работала переливная труба.
- 4.3. Поворотом турели установить перед отверстием в баке круглое отверстие диаметром $d = 20$ мм и закрепить турель в этом положении.
- 4.4. Открыть рычажный клапан и обеспечить с помощью задвижки истечение воды при постоянном напоре H , измерить его, а также координаты x_k и y_k произвольно выбранной точки K траектории струи.
- 4.5. Измерить расход воды Q с помощью мерного бака и секундомера (измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров). Результаты измерений записать в таблицу 5.1.
- 4.6. Устанавливая с помощью поворотной турели против отверстия поочередно внешний цилиндрический и конические (сходящийся и расходящийся) насадки, измерить для каждого из них расход воды Q и напор H (последний должен поддерживаться в опытах постоянным и равным напору при истечении из круглого отверстия). Результаты измерений записать в таблицу 5.1.
- 4.7. Обработать опытные данные, выполнив все вычисления, предусмотренные в таблице 5.1.
- 4.8. Дать заключение по результатам работы.

5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Схему лабораторной установки.
- 5.3. Основные теоретические и расчетные формулы.
- 5.4. Таблицу с данными измерений и результатами расчетов.

6 Вопросы для самопроверки

- 6.1. Что понимают под малым отверстием в тонкой стенке при истечении жидкости из отверстий?
- 6.2. Сжатое сечение, причины сжатия струи. Чем оценивают величину сжатия струи?
- 6.3. Что называют насадкой, типы насадок, их назначение?
- 6.4. Коэффициент скорости. Что он учитывает, как определяется?
- 6.5. Коэффициент расхода. Что он учитывает, как определяется?
- 6.6. Коэффициент сопротивления (отверстия, насадка). Как он определяется по опытным данным?
- 6.7. Объясните, почему при истечении из насадок расход жидкости больше, чем при истечении из малого круглого отверстия в тонкой стенке?
- 6.8. Напишите и поясните формулы для определения скорости и расхода при истечении жидкости из отверстий и насадок в атмосферу при постоянном напоре.
- 6.9. Где больше скорость истечения жидкости через насадку или через отверстие?
- 6.10. Изобразите и поясните схемы истечения жидкости из малого отверстия в тонкой стенке и через внешний цилиндрический насадок в атмосферу.

Таблица 5.1 – Результаты исследований по определению коэффициентов μ_{exp} , φ_{exp} , ε_{exp} , ζ_{exp} , $\mu_{Nexp} = \varphi_{Nexp}$ и ζ_{Nexp}

№	Измеряемые и вычисляемые величины	Ед. изм.	Экспериментальные данные			
			Круг. отв.	Насадки		
				Цил.	Конич. сход.	Конич. расход.
1	Диаметры отверстия и насадков на выходе d	м	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
2	Площади круглого отверстия и насадков на выходе $\omega = \pi d^2 / 4$	м ²				
3	Объем воды в мерном баке W	м ³				
4	Время наполнения t	с				
5	Расход воды $Q = W/t$	м ³ /с				
6	Напор истечения H	м				
7	Координаты произвольной точки K траектории струи, вытекающей из круглого отверстия	x_k	м			
		y_k	м			
8	Коэффициенты расхода отверстия и насадков (по опыту) $\mu_{exp} = Q/\omega\sqrt{2g \cdot h}$	–				
9	Коэффициенты расхода и скорости насадков (по опыту) $\varphi_{Nexp} = \mu_{Nexp}$	–				
10	Коэффициент скорости отверстия (по опыту) $\varphi_{exp} = x_k/\omega\sqrt{2g \cdot h}$	–				
11	Коэффициент сопротивления отверстия и насадков (по опыту) $\zeta = 1/\varphi^2 - 1$	–				
12	Коэффициент сжатия отверстия и насадков (по опыту) $\varepsilon_{exp} = \mu_{exp} / \varphi_{exp}$	–				
13	Справочные значения коэффициентов расхода, скорости, сопротивления и сжатия для отверстия и насадков	μ_{ref}	–			
		φ_{ref}	–			
		ζ_{ref}	–			
		ε_{ref}	–			
14	Относительные отклонения коэффициентов расхода, скорости, сопротивления и сжатия для отверстия и насадков	$\Delta\mu = \frac{(\mu_{ref} - \mu_{exp})}{\mu_{ref}}$	–			
		$\Delta\varphi = \frac{(\varphi_{ref} - \varphi_{exp})}{\varphi_{ref}}$	–			
		$\Delta\zeta = \frac{(\zeta_{ref} - \zeta_{exp})}{\zeta_{ref}}$	–			
		$\Delta\varepsilon = \frac{(\varepsilon_{ref} - \varepsilon_{exp})}{\varepsilon_{ref}}$	–			

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

1 Цель работы

Определить опытным путем величину повышения давления Δp_{exp} при прямом гидравлическом ударе в напорном трубопроводе, сравнить ее с величиной Δp , вычисленной по формуле (1), и подсчитать относительное отклонение между ними.

2 Общие сведения

Гидравлическим ударом называется изменение (повышение или понижение) давления в напорном трубопроводе при резком изменении скорости движения жидкости (например, в результате резкого закрытия или открытия затвора).

Повышение давления при гидравлическом ударе может быть настолько большим, что способно привести к разрыву трубопровода.

При быстром закрытии затвора сначала остановится не вся масса жидкости, заключенная в трубопроводе, а лишь часть ее, находящаяся непосредственно перед затвором. Это происходит благодаря инерции и упругим свойствам жидкости и материала трубы (остановившаяся масса жидкости несколько сжимается, труба расширяется, а давление в жидкости резко возрастает). Затем повышение давления весьма быстро распространяется по трубопроводу от затвора к резервуару. Скорость распространения повышения давления называют скоростью распространения ударной волны C . После того как во всем трубопроводе давление повысится, жидкость начнет выходить из зоны повышенного давления обратно в резервуар, давление в трубопроводе начнет понижаться. Затем в зону пониженного давления снова пойдет жидкость из резервуара, и давление снова повысится. Благодаря упругим свойствам жидкости и стенок трубопровода этот процесс довольно быстро затухает. Наиболее опасным является первое повышение давления.

Ударная волна пройдет по всему трубопроводу (от затвора до резервуара) за время $t = L/C$ (здесь L – длина трубопровода). Время одного цикла, включающего повышение и понижение давления, называется фазой удара $T = 2L/C$.

Если время закрытия t_{close} затвора меньше или равно фазе удара T ($t_{close} \leq T$), удар называется прямым.

Удар может возникнуть, например, при внезапном выключении насоса, подающего воду по нагнетательному трубопроводу в резервуар. Жидкость после выключения насоса по инерции некоторое время будет двигаться, и в трубопроводе возникнет пониженное давление. Затем начнется обратное движение жидкости из резервуара в область пониженного давления в трубопроводе, и давление здесь повысится подобно тому, как это наблюдалось при прямом ударе.

Из изложенного ясно, что параметры движения жидкости при гидравлическом ударе изменяются с течением времени. Следовательно, при гидравлическом ударе движение жидкости является неустановившимся.

Для определения повышения давления Δp при прямом гидравлическом ударе используется формула

$$\Delta p = \rho \cdot C \cdot v, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости;

C – скорость распространения ударной волны;

v – средняя скорость движения жидкости в трубопроводе до закрытия затвора (при установившемся движении).

Величину C вычисляют по формуле

$$C = \frac{\sqrt{E_w/\rho}}{\sqrt{1 + (E_w d / E_{st} s)}}, \quad (2)$$

где E_w и E_{st} – модули упругости жидкости и материала трубопровода, соответственно;

ρ – плотность жидкости;

d – внутренний диаметр трубопровода;

s – толщина стенки трубопровода.

Величины модуля упругости жидкости и ее плотность определяют скорость распространения звука в жидкой среде C_{snd} :

$$C_{snd} = \sqrt{E_w/\rho}. \quad (3)$$

С учетом (3):

$$C = \frac{C_{snd}}{\sqrt{1 + (E_w d / E_{st} s)}}, \quad (4)$$

3 Описание опытной установки

Симуляционная модель лабораторной установки (рисунок 6.1) включает питающий резервуар (1), подача воды в который регулируется краном (2), а уровень воды поддерживается на постоянной отметке во время эксперимента. К резервуару присоединен горизонтальный стальной трубопровод (3). В конце трубопровода имеется пружинный манометр (4), с помощью которого измеряется давление в жидкости до и в момент закрытия клапанного затвора (5), позволяющего практически мгновенно перекрывать трубопровод. Скорость движения воды регулируется вентилем (6). Для измерения расхода воды служит мерный бак (7), снабженный водомерной трубкой со шкалой, и секундомер. Основные характеристики лабораторной установки представлены на схеме (рисунок 6.2).

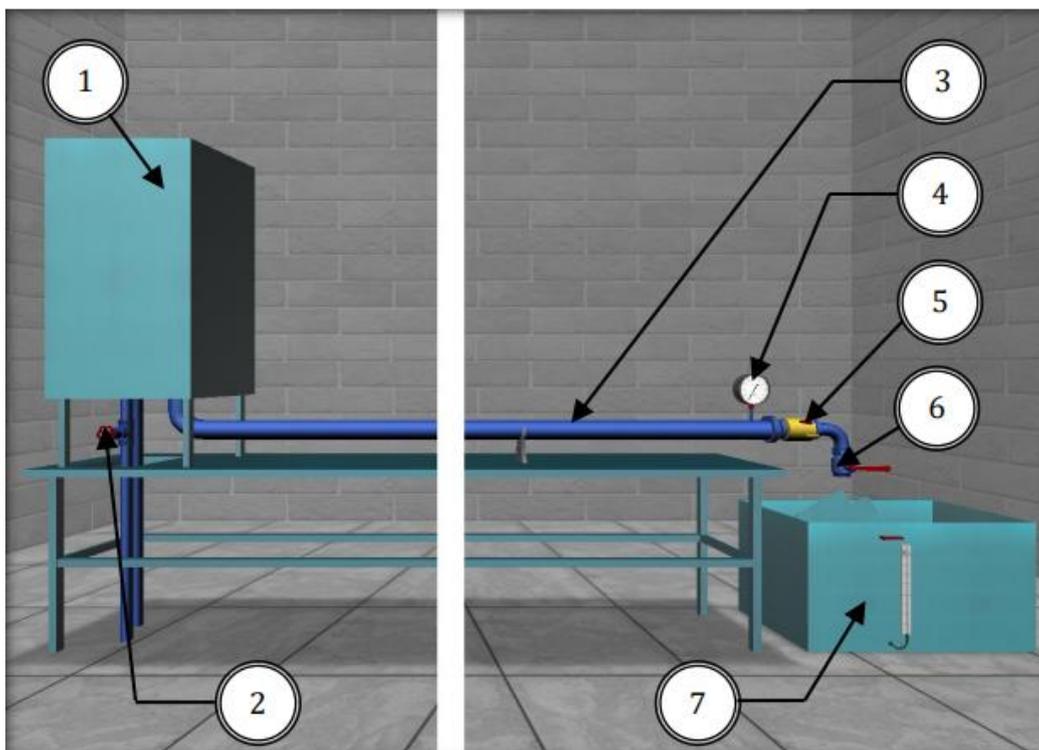


Рисунок 6.1 – Внешний вид симуляционной лабораторной установки

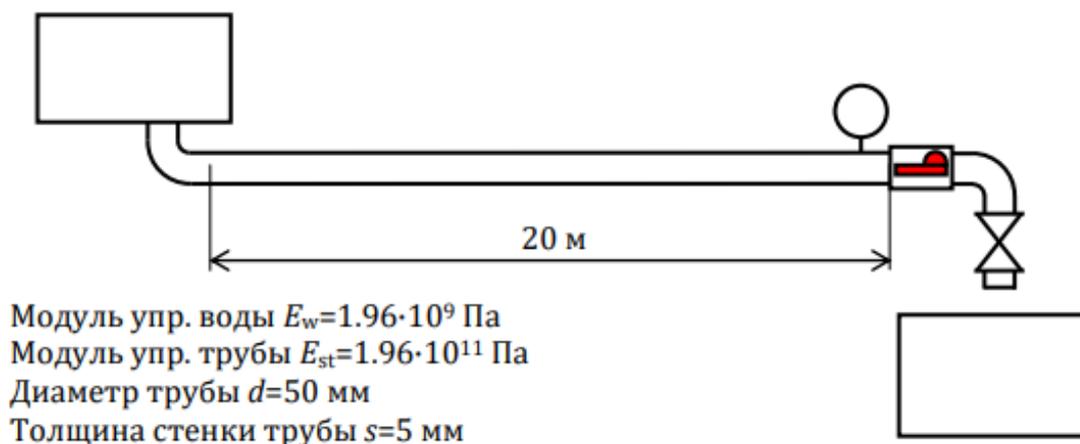


Рисунок 6.2 – Основные характеристики лабораторной установки

4 Порядок проведения работы

- 4.1. Измерить по манометру давление в трубопроводе до удара (при закрытом регулировочном вентиле) и результаты измерения записать в таблицу 6.1.
- 4.2. Открыв (не полностью) регулировочный вентиль, обеспечить пропуск по трубопроводу некоторого расхода воды.
- 4.3. Измерить расход воды Q с помощью мерного бака и секундомера. При этом измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров.
- 4.4. Перекрыть клапанным затвором трубопровод и измерить по манометру величину максимального давления при ударе.
- 4.5. Записать в таблицу полученные при измерениях данные.
- 4.6. Сделать еще два аналогичных опыта при других расходах воды.
- 4.7. Обработать опытные данные согласно пунктам таблицы 6.1.
- 4.8. Дать заключение по результатам работы.

5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Схему лабораторной установки.
- 5.3. Основные теоретические и расчетные формулы.
- 5.4. Таблицу с данными измерений и результатами расчетов.

6 Вопросы для самопроверки

- 6.1. Сформулируйте понятие гидравлического удара.
- 6.2. Прямой и не прямой гидравлический удар.
- 6.3. Что такое фаза удара?
- 6.4. Объясните процесс изменения давления в трубопроводе, питаемом из резервуара, при прямом гидравлическом ударе.
- 6.5. Напишите и поясните формулу Н. Е. Жуковского для определения повышения давления при ударе.
- 6.6. Напишите и поясните формулу для определения скорости распространения ударной волны.
- 6.7. Каковы основные меры борьбы с гидравлическим ударом?

Таблица 6.1 – Результаты исследований по определению величины повышения давления Δp_{exp} при прямом гидравлическом ударе в напорном трубопроводе

№ п/п	Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений		
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1	Внутренний диаметр трубопровода d_i	м			
2	Толщина стенки трубопровода δ_i	м			
3	Площадь поперечного сечения трубопровода $S_i = \pi d_i^2 / 4$	м ²			
4	Объем воды в мерном баке W_i	м ³			
5	Время наполнения объема t_i	с			
6	Расход воды в трубопроводе $Q_i = W_i / t_i$	м ³ /с			
7	Средняя скорость движения воды в трубопроводе (до удара) $v_i = Q_i / S_i$	м/с			
8	Скорость распространения ударной волны $C_i = \frac{1425}{\sqrt{1 + E_w d_i / E_{st} \delta_i}}$	м/с			
9	Повышение давления при ударе $\Delta p_i = \rho C_i v_i$	Па			
10	Давление в трубопроводе до удара (по манометру) p_1	Па			
11	Наибольшее давление в трубопроводе при ударе (по манометру) p_2	Па			
12	Повышение давления при ударе (по опытам) $\Delta p_{exp} = p_2 - p_1$	Па			
13	Относительное отклонение $E_p = (\Delta p - p_{exp} / \Delta p) \cdot 100$	%			

Учебное издание

Составители:

Голуб Владимир Михайлович

Аббасов Кирилл Тимурович

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплинам:

«Механика жидкости и газа»

для студентов специальности 6-05-0714-02

*Технология машиностроения, металлорежущие станки
и инструменты (профилизация «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»);*

«Гидро- и пневмопривод, гидро- и пневмоавтоматика»

для студентов специальности 6-05-0714-02

*Технология машиностроения, металлорежущие станки
и инструменты (профилизация «Технология машиностроения»);*

*«Гидро- и пневмопривод» для студентов специальности
6-05-0714-04 Технологические машины и оборудование*

ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ГИДРОМЕХАНИКИ
ЧАСТЬ 1

Ответственный за выпуск: Аббасов К. Т.

Редактор: Винник Н. С.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А. П.

Корректор: Дударук С. А., Северянина А. Г.

Подписано в печать 27.12.2024 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 2,79. Уч. изд. л. 3,0. Заказ № 1288. Тираж 30 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.

