

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ)
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.И. Худовец

ГИДРАВЛИКА

Лабораторный практикум

Благовещенск
Издательство
Дальневосточного государственного аграрного университета
2019

УДК 531(076)
ББК 30.123я7
Х98

Рецензент – Нина Михайловна Ларченко, канд. техн. наук, доцент

Х98 Худовец, Валентина Ивановна

Практикум для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Гидравлика» / Дальневост. гос. аграр. ун-т, ФМСХ ; сост. В.И. Худовец. – Благовещенск: Изд-во Дальневост. гос. аграр. ун-та, 2019. – 73, [1] с.

Составлен в соответствии с программами этих курсов для студентов образовательных организаций высшего образования. Содержит описание и методику проведения лабораторных работ по дисциплинам гидромеханического цикла (гидравлика, гидравлика и гидропневмопривод). Изложены краткие сведения из теории, необходимые для проведения лабораторных работ. Дано описание лабораторных установок. Описаны методы проведения опытов и обработка результатов. В каждой работе приводятся необходимые теоретические сведения, дается описание опытной установки, указывается порядок выполнения работы и обработки полученных экспериментальных данных.

Предназначен для студентов инженерных направлений подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 35.03.06 Агроинженерия очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

**УДК 531(076)
ББК 30.123я7**

Рекомендовано к изданию решением методического совета факультета механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ (Протокол № 4 от 17 декабря 2018 г.)

© Худовец В.И., 2019
© ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, 2019
© Оформление. Изд-во Дальневост. гос. аграр. ун-та, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
Лабораторная работа № 1 Методы измерения гидростатического давления	5
Лабораторная работа № 2 Определение выигрыша в силе при работе гидравлического пресса	21
Лабораторная работа № 3 Относительный покой жидкости	28
Лабораторная работа № 4 Изучение режимов течения жидкости (опыт Рейнольдса)	36
Лабораторная работа № 5 Исследование уравнения Бернулли	45
Лабораторная работа № 6 Определение коэффициента гидравлического сопротивления по длине трубопровода при напорном движении жидкости	51
Лабораторная работа № 7 Определение коэффициентов местных сопротивлений	60
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практикум включает комплекс лабораторных работ, которые выполняются на экспериментальных виртуальных установках.

Помимо основного назначения – подготовки студентов к выполнению лабораторных работ, предлагаемое пособие может быть использовано для самостоятельного изучения отдельных вопросов курса. Для этого в начале описания каждой работы дается краткое изложение физической сущности и основ теории изучаемого процесса. Затем излагается содержание лабораторной работы, экспериментальной методики, приводится описание опытной установки, а также даются методические указания по проведению эксперимента, обработке полученных данных и составлению отчета. В конце каждой лабораторной работы помещены контрольные вопросы, которые составлены с таким расчетом, чтобы фиксировать внимание студентов на узловых моментах темы и способствовать лучшему усвоению ими изучаемого материала. Все это облегчит самостоятельную подготовку к лабораторным занятиям и работу студентов в лаборатории, что особенно важно для студентов заочной формы обучения.

Студент допускается к выполнению лабораторной работы при условии предварительной проработки устройства и принципа действия экспериментальной установки, теоретических основ и порядка выполнения работы, которые изложены в настоящем практикуме.

Проверка готовности студента к работе осуществляется путем программированного контроля.

Лабораторная работа выполняется одним или группой студентов (не более трех человек) под руководством преподавателя.

Отчет по каждой работе оформляется на специальном типографском бланке (в отдельной тетради), который должен содержать схему экспериментальной установки, полученные опытные данные и результаты их обработки. Форма бланков приведена в приложении.

При выполнении расчетов необходимо соблюдать правила приближенных вычислений и следить за точностью записи исходных данных, промежуточных и окончательных результатов. В числах, фигурирующих в расчетах, как правило, должно быть не более двух значащих цифр после запятой.

Отчет о лабораторной работе студент должен защитить и получить зачет (зачет с оценкой).

Работа на лабораторных установках производится на персональных компьютерах, только с разрешения и под наблюдением преподавателя.

Лабораторная работа № 1

Методы измерения гидростатического давления

Цель работы: изучение конструкций приборов и способов измерения гидростатического давления.

В международной системе единиц за единицу давления принят Паскаль (Па) – давление, которое испытывает 1 м^2 плоской поверхности под действием равномерно распределенной, перпендикулярной к этой поверхности силы в 1 Н.

$$1\text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Для измерения средних и высоких давлений применяют кратные единицы: кило паскаль (кПа) и мега паскаль (МПа). Принимают, что

$$1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 0,1\text{ МПа}$$

тогда, например,

$$0,6 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 0,06\text{ МПа}, \quad 10 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 1\text{ МПа} \quad \text{и т.д.}$$

В технике используют так же техническую атмосферу p_a , равную

$$p_a = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 1 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па}; \quad 1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па.}$$

В качестве упругих деформационных элементах в приборах давления используются мембраны, мембранные коробки, сиффоны и трубчатые пружины (рис. 1).

Плоские мембраны (рис. 1, а), изготавливаемые из стали и бронзы, представляют собой круглые тонкостенные пластины постоянной толщины. Под действием измеряемого давления $P_{изм}$ мембранная пластина прогибается. Приборы этого типа обладают малой инерционностью и позволяют измерять примерное давление с частотой до сотен герц. Прогиб мембраны дифференциально-трансформаторным преобразователем (ДПТ) преобразуется в электрический сигнал $U_{вых}$.

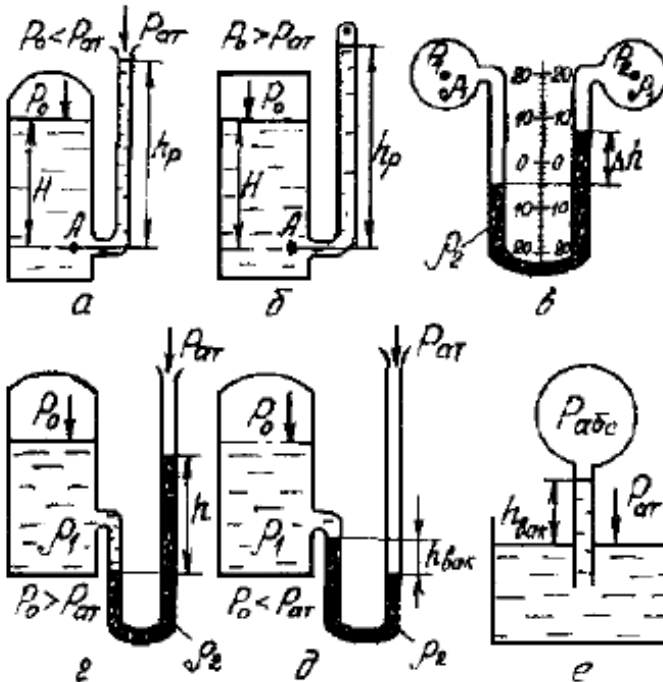


Рис. 1. Жидкостные приборы для измерения давления:
 пьезометры открытого (а) и закрытого (б) типа; дифманометр (в);
 U - образные (г) манометр и вакуумметр (д); простой вакуумметр (е)

Гофрировка поверхности мембраны в виде кольцевых волн значительно повышает ее надежность и спрямляет характеристику мембраны. В дифманометрах применяются мембранные коробки, образованные двумя спаянными гофрированными мембранами (рис. 1, б).

В приборах давления, измеряющих малые давления (тягомерах, дифманометрах) применяют неметаллические (вялые) мембраны (рис. 1, в). Эти мембраны изготовляют из специальной сетчатой ткани (капрона, шелка), покрытой бензомаслостойкой резиной или пластмассой. Характеристики вялых мембран снимают экспериментально, т.к. рассчитать их не удастся. Для повышения жесткости вялых мембран применяют пружины.

Сильфоны представляют собой тонкостенную трубку с поперечной гофрировкой (рис. 1, г). Сильфоны применяют в приборах для измерения вакуумметрического давления до $1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} (0,1 \text{ МПа})$, избыточного давления до $600 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ и разности давлений до $2,5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} (0,25 \text{ МПа})$. При работе на сжатие сильфоны выдерживают давление в 1,5 – 2 раза больше, чем при воздействии давления изнутри. Статическая характеристика сильфонов линейна в небольших диапазонах перемещений.

Трубчатые пружины чаще всего выполняются в виде одновитковых, центральная ось которых представляет собой дугу окружности с центральным углом, равным $200 - 270^\circ$ (рис. 1, д). Наиболее широкое применение получили пружины Бурдона эллиптического (рис. 1, е) и плоскоовального сечения. Большая ось $2a$ поперечного сечения расположена перпендикулярно радиусу кривизны R_k центральной оси (среднему радиусу) пружины.

Один конец Бурдона закрепляется неподвижно, а другой – свободный, закрытый пробкой и запаянный – соединяют с механизмом прибора – стрелочным указателем или преобразователем.

Тонкостенные пружины Бурдона (рис. 1, е) применяют в приборах для измерения вакуумметрического давления до

$1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} (0,1 \text{ МПа})$ и избыточного давления до $60 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} (6 \text{ МПа})$. Для из-

мерения избыточного давления $200-1600 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} (20-160 \text{ МПа})$

применяют толстостенные пружины овального сечения. Для из-

мерения сверхвысокого давления до $10000 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} (1000 \text{ МПа})$ и

выше применяют одновитковые трубчатые пружины с эксцентричным каналом.

Под действием измеряемого давления $P_{\text{изм}}$ пружина Бурдона деформируется в поперечном сечении, принимая форму, изображенную на рисунке 1е пунктиром. Продольные волокна элемента пружин растягиваются наиболее значительно у малой полуоси. В продольных волокнах наружного радиуса трубки Бурдона будет возникать растяжение, а в волокнах внутреннего радиуса – сжатие. Вследствие того, что волокна стремятся сохранить свою первоначальную длину, трубка Бурдона будет разгибаться. При этом свободный конец трубки совершит некоторое линейное перемещение λ . Кривизна трубки уменьшится на угол (рис. 1, д):

$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma_1$$

Трубчатый манометр тем чувствительнее, чем больше радиус ее кривизны R_k и чем меньше толщина стенок δ трубки.

Чувствительность трубки Бурдона, а также ее жесткость, в сильной степени зависят от отношения $\frac{a}{b}$ осей поперечного сечения формы сечения (массы металла) вблизи концов большой оси. Пружина эллиптического сечения (рисунок 1е) обладает большей чувствительностью и меньшей жесткостью, чем плоскоовального сечения.

Пружина круглого сечения практически не чувствительна к давлению, т.к. поперечное сечение не деформируется при воздействии давления.

В трубчатых пружинах с эксцентричным каналом перемещения свободного конца происходит под действием в поперечном сечении изгибающего момента. Силы давления, приложенные в полости канала пружины, деформируют стенки канала, который расположен эксцентрично относительно сечения трубки. В результате пружина изгибается в сторону более толстой стенки.

Для изготовления мембран, сильфонов и трубчатых пружин необходим материал с высокой упругостью, антикоррозийностью, малой зависимостью параметров от изменения температуры, который также должен хорошо поддаваться технологической обработке, пайке и сварке. Указанным требованиям отвечают бронза, латунь и хромоникелевые сплавы.

Статическая характеристика упругого элемента представляет собой зависимость перемещения λ от измеряемого давления $P_{изм}$, т.е.

$$\lambda = f(P_{изм})$$

Обычно при проектировании упругих чувствительных элементов стремятся получить их линейную характеристику. Важными параметрами упругого чувствительного элемента являются:

- жесткость подавлению

$$K_p = \frac{P_{изм}}{\lambda} \left(\frac{Па}{м} \right);$$

- чувствительность по давлению

$$S_p = \frac{\lambda}{P_{изм}} \left(\frac{м}{Па} \right);$$

- гистерезис

$$\delta_a = \left(\frac{\Delta\lambda_{\max}}{\lambda_{\max}} \right) \cdot 100(\%),$$

где $\Delta\lambda_{\max}$ – максимальная разность при прямом и обратном ходе;

λ_{\max} – полное отклонение чувствительного элемента.

Приборы для измерения давления по характеру измеряемой величины подразделяются на:

а) барометры, измеряющие атмосферное давление;

б) манометры, измеряющие разность абсолютного и атмосферного давления, т.е. избыточного (манометрического) давления;

в) вакуумметры, служащие для измерения отрицательного избыточного давления - вакуума;

г) мановакуумметры, измеряющие как избыточное давление, так и вакуумметрическое;

д) дифференциальные манометры, которые измеряют разность давлений.

По принципу действия различают приборы жидкостные и механические.

К *жидкостным* приборам относятся: пьезометр, манометр, дифференциальный манометр. Жидкостные приборы (рис. 1) основаны на уравнивании измеряемого давления высотой столба рабочей жидкости определенного объемного веса.

К *механическим* приборам (рис. 2) относятся: пружинно-трубчатые и мембранные манометры, мановакуумметры, барометры. Действие механических манометров основано на применении закона Гука. Сила давления деформирует упругий элемент прибора (пружину, мембрану), а возникшая деформация, после тарирования, является мерой давления.

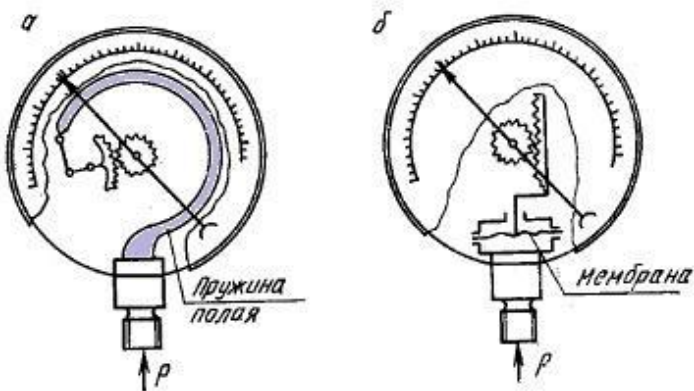


Рис. 2. Механические манометры.

а – пружинный; б – мембранный

При определении гидростатического давления, как правило, оперируют абсолютным (полным) давлением P , манометрическим (избыточным) давлением $P_{\text{ман}}$ и вакуумом $P_{\text{вак}}$ (отрицательным избыточным давлением).

Манометрическое (избыточное) давление - это избыток абсолютного давления над атмосферным. Эта разность может быть, как положительной, так и отрицательной.

Вакуум - отрицательное избыточное давление (недостаток абсолютного давления до атмосферного).

Полное или *абсолютное* гидростатическое давление P в любой точке покоящейся жидкости складывается из давления на свободной поверхности жидкости P_0 и веса столба жидкости с основанием равным единице площади и высотой равной глубине h расположения рассматриваемой точки под уровнем свободной поверхности:

$$p_{\text{абс}} = \rho g h + p_0 \quad (1)$$

Между величинами давления существуют следующие зависимости:

– давление манометрическое

$$p_{\text{ман}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}} \quad (2)$$

– давление вакуума

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}} \quad (3)$$

Из рисунка 3 видно, что величина вакуума не может быть больше атмосферного давления. Отсюда можно сформулировать понятия манометрического давления и вакуума.

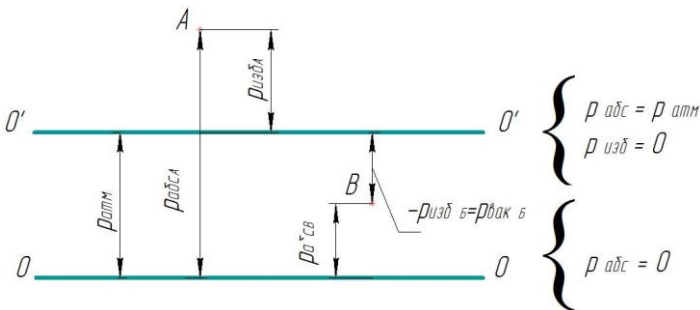


Рис. 3. Пределы измерений давлений

Экспериментальная установка

Изучая способы измерения гидростатического давления, рассмотрим некоторую замкнутую область, заполненную воздухом, для чего используется экспериментальная установка (рисунок 4)

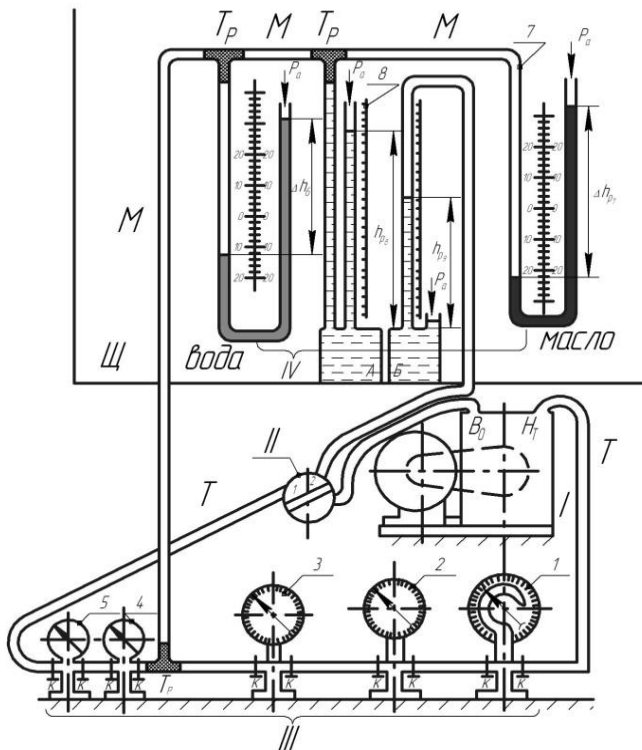


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка лабораторной работы на компьютере выглядит следующим образом:

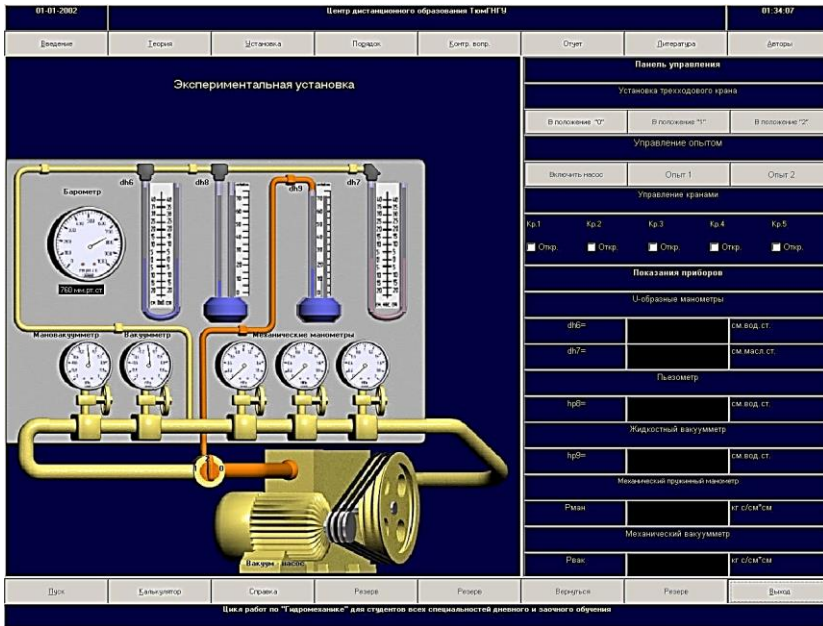


Рис. 5. Компьютерное изображение лабораторной установки для измерения гидростатического давления

Установка состоит из вакуум – насоса **I**, трехходового крана **II**, группы механических приборов **III**, группы жидкостных манометров **IV**.

В группу механических приборов **III** входят: пружинно – трубчатый манометр открытого типа (1), пружинно – трубчатые манометры закрытого типа (2 и 3), включенные в линию нагнетания вакуум – насоса (**I**) при помощи резиновых трубок **T**, мановакуумметр закрытого типа (5), включенные в линию всасывания вакуум – насоса (**I**) при помощи резиновых трубок.

Группа жидкостных приборов **IV** смонтирована на щите **Щ**. Состоит из двух **U** – образных манометров:

- (одно колено сообщается с атмосферой) и двух пьезометров;
- **U** – образный манометр (**6**) заполнен водой;
- **U** – образный манометр (**7**) заполнен веретенным маслом и включен в линию нагнетания вакуум – насоса (**I**) при помощи металлических трубок **M** и тройников **Тр**;
- пьезометр (**8**) с открытым верхним концом, сообщенным с атмосферой и нижним концом, опущенным в закрытый резервуар **A**, заполненный водой, сообщается с линией нагнетания вакуум – насоса (**I**) при помощи металлических трубок **M** и тройников **Тр**;
- вакуумметр (**9**), верхний конец которого связан с линией всасывания вакуум – насоса (**I**) при помощи металлических трубок **M**, а нижний конец опущен в открытый резервуар **Б**, заполненный водой.

Порядок выполнения работы

На экспериментальной установке устанавливаем трехходовой кран **II** в позицию **0** и включаем электродвигатель вакуум – насоса **I**. В нагнетательной линии вакуум – насоса **I** устанавливается давление больше атмосферного, во всасывающей линии вакуум – насоса **I** устанавливается давление меньше атмосферного. После стабилизации давления в системе, что определяется по устойчивым показаниям приборов (уровни жидкости в коленах **U** – образных манометров **6** и **7** и в пьезометре **8** установились без колебаний), приступить к проведению опытов.

Опыт 1. Переключаем трехходовой кран **II** в позицию 1. После стабилизации давления снимаем показания приборов.

Показания группы механических приборов **III**: механических манометров **1,2,3**, которые измеряют избыточное давление

воздуха в нагнетательной линии вакуум – насоса **I**, механических мановакуумметра **4** и вакуумметра **5**, которые измеряют вакуум (разряжение) воздуха во всасывающей линии вакуум – насоса. Механические приборы работают одновременно приоткрытых кранах **K**. При необходимости можно отключить любой из них, перекрывая соответствующий кран **K**.

Показания приборов группы **IV**, которые измеряют избыточное давление в нагнетательной линии вакуум – насоса **I**: **U** – образных манометров **6** и **7** (отчеты снимаем по шкале прибора как перепад уровней Δh_6 и Δh_7) и пьезометра **8**, показание которого h_{p8} снимаем как высоту подъема воды из открытого резервуара **A**, отсчет производится от условного нуля шкалы прибора до мениска воды, находящейся в пьезометре (среднее значение трехразовых измерений заносим в таблицу **1**).

Опыт 2. Для измерения вакуума во всасывающей линии вакуум – насоса **I** при помощи жидкостного вакуумметра **9** производим переключение трехходового крана **II** в позицию **2**. После стабилизации давления в системе снимаем показание вакуумметра как высоту подъема жидкости (воды) из открытого резервуара **B** (отсчет производится от условного нуля по шкале до уровня мениска жидкости, находящейся в вакуумметре **9**). Значения измерений давления заносим в таблицу **1**.

1. Избыточное давление по показаниям пьезометра определяется по формуле

$$P_{изб} = \rho g h_{p8}, \quad (1)$$

где h_{p8} – показание пьезометра, м. ст. жид.;

ρ – плотность воды ($1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

2. Вычисление вакуума по показанию жидкостного вакуумметра определяется по формуле

$$P_{\text{вак}} = \rho g h_{p9}, \quad (2)$$

где h_{p9} - показание вакуумметра, м. ст. жид.

3. Вычисление избыточного давления по показаниям U – образных манометров определяется по формулам

$$P_{\text{изб}_6} = \rho g \Delta h_6, \quad (3)$$

$$P_{\text{изб}_7} = \rho g \Delta h_7, \quad (4)$$

где $\Delta h_6, \Delta h_7$ -показания U – образных манометров 6,7 соответственно, м ст. жид.;

ρ – плотность масла ($800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

4. Используя расчетные значения избыточного и вакуумметрического давлений и показания механических приборов, определить абсолютное давление по формуле

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{изб}} + P_{\text{атм}}, \quad (5)$$

Атмосферное давление

$$P_{\text{атм}} = 1 \text{ ат} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 10^4 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2} = 9,81 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 98,1 \text{ кПа}.$$

Результаты вычислений необходимо представить в двух системах единиц измерений: технической (МКГСС) и международной (СИ).

В таблице 1 следует внести сначала единицы измерения по прибору (столбец 3), а затем в столбец 4 внести показания прибора.

Таблица 1

Наименование прибора	Единицы измерения давления	Показания прибора	Избыточное давление		Абсолютное давление	
			МКГСС	СИ	МКГСС	СИ
			$\frac{кгс}{м^2}$	Па	$\frac{кгс}{м^2}$	Па
2	3	4	5	6	7	8
Пьезометр						
Жидкостный вакуумметр						
U-образный водный манометр						
U-образный масляный манометр						
Механический пружинный манометр						
Механический вакуумметр						
Барометр						

Расчет давления можно проводить с помощью встроенного калькулятора, для этого следует включить кнопку «Калькулятор» в нижнем левом углу экрана

Калькулятор появляется поверх экспериментальной установки. Его можно перемещать при помощи курсора в любое удобное для работы место.

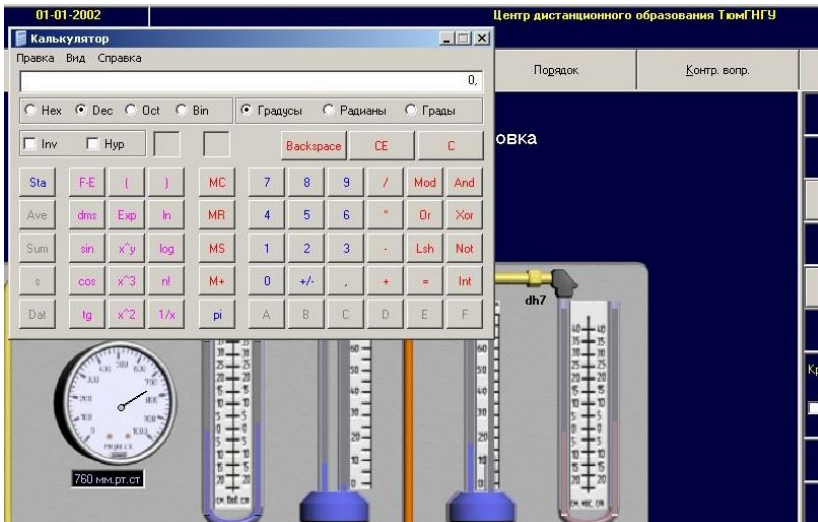
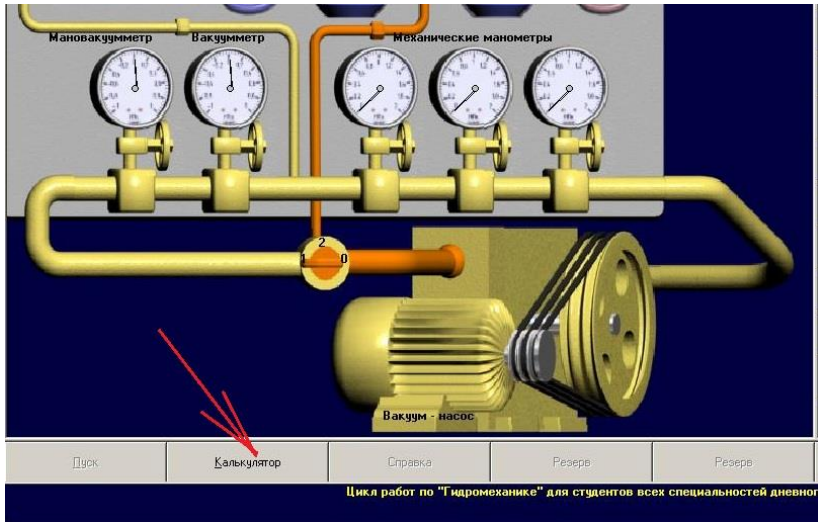


Рис. 6 Кнопка вызова калькулятора

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются приборы для измерения гидростатического давления?

2. Опишите устройство и принцип действия жидкостных и механических приборов для измерения гидростатического давления?

3. Укажите достоинства и недостатки приборов для измерения давления?

4. Какие виды давления существуют, по каким формулам можно произвести расчет?

5. Абсолютное давление $P = 3 \cdot 10^5 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$. Определите избыточное давление и выразите в СИ?

6. Какой из приборов позволяет отсчитывать избыточное давление с большей точностью и почему?

7. Назовите наибольшую величину вакуума.

Лабораторная работа № 2

Определение выигрыша в силе при работе гидравлического пресса

Цель работы:

1. Знакомство с устройством, принципом работы гидропресса и использование закона Паскаля для определения выигрыша в силе.
2. Изучение влияния различных факторов на выигрыш в силе.

Основой для определения выигрыша в силе при работе на гидравлическом прессе является *закон Паскаля*: гидростатическое давление, действующее на пограничную область жидкости, находящейся в замкнутом сосуде, передается внутрь жидкости одинаково всем частицам. Это же справедливо и для газов.

Этот закон был установлен экспериментально французским физиком и математиком Блэзом Паскалем (1623–1662) и носит его имя.

Закон Паскаля выведен и сформулирован при условии отсутствия силы тяжести. Наличие силы тяжести не изменяет сути закона и вносит дополнительную связь между давлениями в различных точках жидкости или газа.

Определим гидростатическое давление, действующее на пограничную поверхность CD (рис. 7) малый поршень–жидкость, где ω_m - площадь поперечного сечения малого поршня диаметром d_m , и на пограничную поверхность MK – большой поршень-жидкость; ω_b - площадь поперечного сечения большого поршня диаметром d_b .

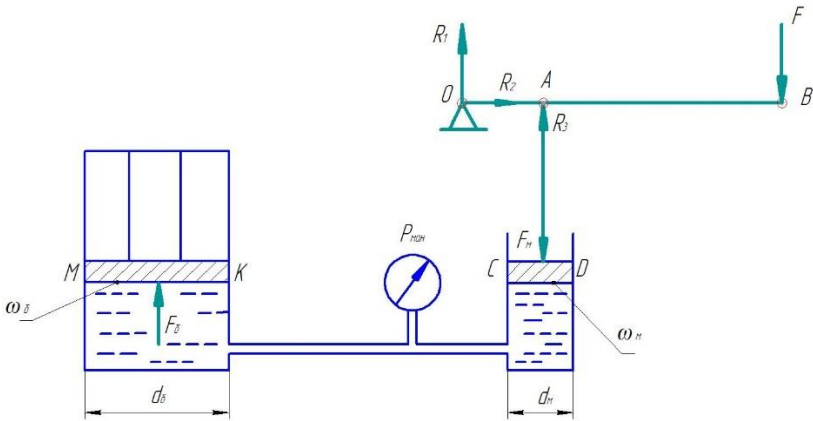


Рис. 7. Принципиальная схема гидрпресса

Давление под малым поршнем

$$p_1 = \frac{F_M}{\omega_M}, \quad (6)$$

где ω_M – площадь поперечного сечения малого поршня, m^2 ; F_M – усилие создаваемое при помощи рычага OB , H .

Давление под большим поршнем

$$p_2 = \frac{F_б}{\omega_б}, \quad (7)$$

где $\omega_б$ – площадь поперечного сечения большого поршня, m^2 ; $F_б$ – усилие передаваемое на большой поршень, H .

Площадь поршня

$$\omega = \pi \cdot R^2.$$

Согласно закону Паскаля

$$p_1 = p_2 = p_{ман}, \quad (8)$$

или

$$\frac{F_M}{\omega_M} = \frac{F_б}{\omega_б} = p_{ман}. \quad (9)$$

Тогда из уравнения (8)

$$F_6 = p_{\text{ман}} \cdot \omega_6 \quad \text{или} \quad F_M = p_{\text{ман}} \cdot \omega_M. \quad (10)$$

Для определения выигрыша в силе рассмотрим равновесие рычага OB , для этого отбросим все связи и действие их заменим реакциями R_1, R_2, R_3 (см. рис. 7).

Запишем уравнение моментов сил, действующих на рычаг относительно точки O :

$$\sum M_0(F_k) = 0; \quad F \cdot OB - R_3 \cdot OA = 0. \quad (10)$$

откуда

$$F = \frac{R_3 \cdot OA}{OB}. \quad (11)$$

По третьему закону Ньютона сила действия равна силе противодействия. Следовательно, имеем

$$F = \frac{F_M \cdot OA}{OB}. \quad (12)$$

Согласно (10) и (12)

$$F = \frac{p_{\text{ман}} \cdot \omega_M \cdot OA}{OB}. \quad (13)$$

Каждое звено, передающее усилие, имеет такой параметр, как *выигрыш в силе*. Это соотношение между приложенным и полученным усилиями. Работа определяется как сила, действующая на протяжении всего расстояния и сохраняется неизменной. Если прикладывать усилие к механизмам с отличным от 1:1 выигрышем в силе, то полученное усилие будет большим за счет уменьшенного хода (например, в механизме тормозов или переключателей скоростей) или же меньшим, выигрывая таким образом в

расстоянии перемещения – например, как в цепном приводе, когда ведущая шестерня больше ведомой. Выигрыш в силе определяется отношением:

$$n = \frac{F_6}{F}. \quad (14)$$

Экспериментальная установка

Гидравлический пресс (рис. 8) состоит из масляного насоса I и непосредственно пресса II с приспособлением для сжатия образцов III.

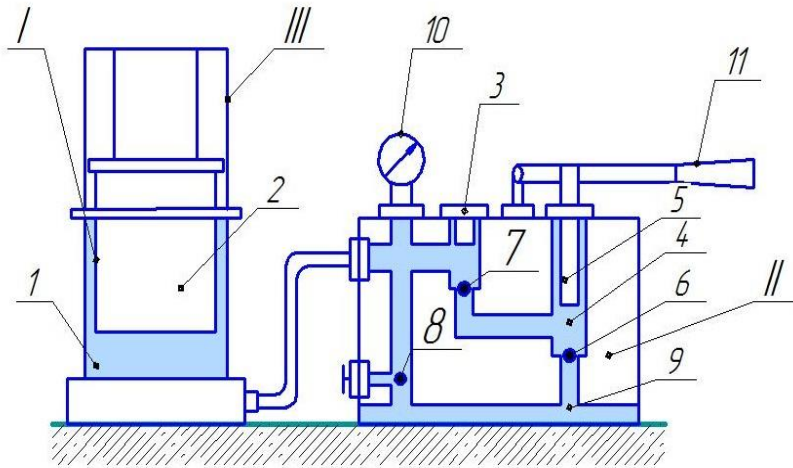


Рис. 8. Гидравлический пресс

Насос имеет прозрачный корпус с предохранительным клапаном 3, цилиндр 4 с малым поршнем 5, всасывающий 6 и нагнетательный 7 клапаны, перепускной клапан 8, резервуар для масла 9 и манометр 10, показывающий избыточное давление масла при работе пресса. Ручное усилие передается в систему с помощью

рычага 11. Пресс II имеет цилиндр, в котором перемещается большой поршень 2. При движении поршня вверх в цилиндре насоса создается разрежение, и масло под действием давления атмосферного воздуха приподнимает шариковый всасывающий клапан, заполняя цилиндр. При движении поршня 5 вниз под действием избыточного давления всасывающий клапан закрывается, масло давит на нагнетательный клапан и, открыв его, поступает в большой цилиндр.

При работе гидропресса перепускной клапан должен быть закрыт. При необходимости опустить большой поршень, нужно отвернуть винт перепускного клапана и надавить на поршень 2-й рукой.

При выполнении лабораторной работы не учитывается:

1. Манометр и поршни могут находиться на разных геометрических уровнях, следовательно, не учитывается гидростатическое давление возникающего столба жидкости.

2. При действии деформации образцов большие поршни несколько передвигаются вверх, следовательно, существуют не учитываемые потери напора в системе насос-цилиндр (т.е. возникает задача не статики, а динамики).

3. Между манжетой и цилиндром существует трение.

4. Не учитывается вес поршня и приспособлений.

Порядок выполнения работы

1. Закройте перепускной клапан (клавиша «Закрывать Кл.1»).

2. Установите на пресс образец для сжатия (клавиша «Уст. образец»).

3. Качайте рукоятку насоса до тех пор, пока манометр не начнет показывать давление (нажать клавишу «Вкл. насос»).

4. Измерить диаметры большого и малого поршней и плечи рукоятки насоса.

5. Возвратите поршень насоса в исходное положение, открыв перепускной клапан (клавиша «Открыть Кл.1»).

01.01.2002 Центр дистанционного образования ТольНГУ 01.39.54

Введение Теория Установка Подборк Эксп. вопр. Ответ Диаметр диаметры

Установка гидравлического пресса

Показания манометра

5.1 МПа/М2

Панель управления

Исходные данные

Диаметр	Фн=1.27 см	Фб=5.04 см
Плечи рычага	ОА=2.6 см	ОВ=7.8 см

Управление опытом

Открыть Кл.1 Отк. образец Отк. насос

Опыт закончен

Таблица данных

№	Фн	Фб	ОА	ОВ	Рман
1	1.27	5.04	2.6	7.8	5.1
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					

Цена работ по "Тарифникам" для студентов всех специальностей дневного и заочного обучения

Рис. 9 Основное окно лабораторной работы № 2.

6. Данные измерений занесите в таблицу 2.

7. Определите выигрыш в силе при следующих изменениях параметров:

- 7.1. Уменьшить диаметр малого поршня в два раза;
- 7.2. Увеличить диаметр большого поршня в два раза;
- 7.3. Увеличить длину плеча ОВ рукоятки рычага в 4 раза;
- 7.4. Уменьшить длину плеча ОА рукоятки рычага в 4 раза;
- 7.5. Увеличить развиваемое давление в два раза;

7.6. Удалить рычаг, ручное усилие F приложить в центре малого поршня.

8. Записать подробный вывод о влиянии вышеперечисленных параметров на выигрыш в силе.

Таблица 2

№№ п/п	Исходные данные					Расчетные данные			
	d_m	d_δ	Плечи рычага		$P_{\text{ман}}$	F_δ	F_m	F_n	n
			ОА	ОВ					
	см	см	см	см	кгс/см ²	кгс	кгс	кгс	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									

Контрольные вопросы

1. Изменится ли выигрыш в силе, если уменьшить (увеличить) диаметр малого (большого) поршней? Докажите.

2. Как влияет соотношение плеч рычага на выигрыш в силе?

3. От каких параметров зависит выигрыш в силе при работе на гидропрессе?

4. Какой вид давления будет под малым поршнем, если рычаг пойдет вверх (вниз)? Почему?

5. Каково практическое применение гидропресса в Вашей будущей специальности?

Лабораторная работа № 3

Относительный покой жидкости

Цель работы:

1. Визуальное наблюдение формы свободной поверхности жидкости во вращающемся сосуде; опытная проверка аналитического выражения.
2. Построение эпюр гидростатического давления для абсолютного и относительного покоя; определение сил действия жидкости на боковые стенки и дно резервуара.

Под *относительным покоем* понимают неподвижное состояние жидкости относительно сосуда, который движется с постоянным ускорением. Например, в относительном покое может находиться жидкость в емкости, которая установлена на разгоняющейся транспортной машине (топливный бак автомобиля). В относительном покое будет также находиться жидкость в сосуде, вращающемся с постоянной скоростью.

Законы, действующие при относительном покое жидкости, принципиально не отличаются от законов гидростатики. Но если в ранее рассмотренных случаях на жидкость действовала только одна массовая сила – сила тяжести, то при относительном покое появляется новая – сила инерции. Это приводит к изменению положения свободной поверхности жидкости и изменению давлений в различных ее точках.

Анализ относительного покоя удобно проводить для сил, действующих на условную частицу жидкости единичной массы (массой $m = 1$). При таком подходе сила всегда численно равна соответствующему ускорению. Например, на частицу единичной

массы действует сила тяжести $G = mg = I g = g$. Таким образом, математические зависимости существенно упрощаются.

В гидравлике как массовые, так и поверхностные силы обычно рассматривают в виде единичных сил: массовые силы относят к единице массы, а поверхностные - к единице площади. Единичная массовая сила численно равна соответствующему ускорению. Единичная поверхностная сила представляет собой напряжение этой силы и в общем случае раскладывается на составляющие: нормальное напряжение (его называют гидромеханическим давлением) и напряжение касательное.

Единичной массовой силой называется массовая сила, приходящаяся на единицу массы.

Из уравнения гидростатики, определяющего равновесие покоящейся жидкости, запишем:

$$dp = \rho(a_x dx + a_y dy + a_z dz). \quad (15)$$

Для поверхности равного давления (*поверхность, во всех точках которой давление имеет одно и то же значение, поэтому разность давлений в разных точках этой поверхности равна нулю $dp = 0$*) имеем

$$a_x dx + a_y dy + a_z dz = 0. \quad (16)$$

При вращении сосуда с жидкостью с постоянной скоростью вокруг вертикальной оси на каждую частицу жидкости действуют массовые силы—сила тяжести и центробежная сила инерции.

Проекции ускорения массовых сил a_x , a_y , a_z на оси координат в данном случае будут

$$a_x = \omega^2 \cdot x, \quad a_y = \omega^2 \cdot y, \quad a_z = -g.$$

С учетом этого выражение (16) примет вид

$$\omega^2 \cdot x dx + \omega^2 \cdot y dy - g dz = 0. \quad (17)$$

Интегрирование последнего выражения дает уравнение параболоида вращения:

$$\frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g} = Z - Z_0, \quad (18)$$

где r - радиус, м;

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

x, y, z - текущие координаты точек на свободной поверхности жидкости;

z_0 - координата пересечения параболоида с осью вращения;

ω - угловая скорость вращения, рад/сек;

ρ - плотность жидкости, кг/м³.

Закон распределения давления в жидкости при относительном покое имеет вид

$$p_{abc} = p_0 + \rho \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2} + \rho g (z_0 - z), \quad (19)$$

где p_{abc} - абсолютное давление в любой точке жидкости с текущими координатами r и z

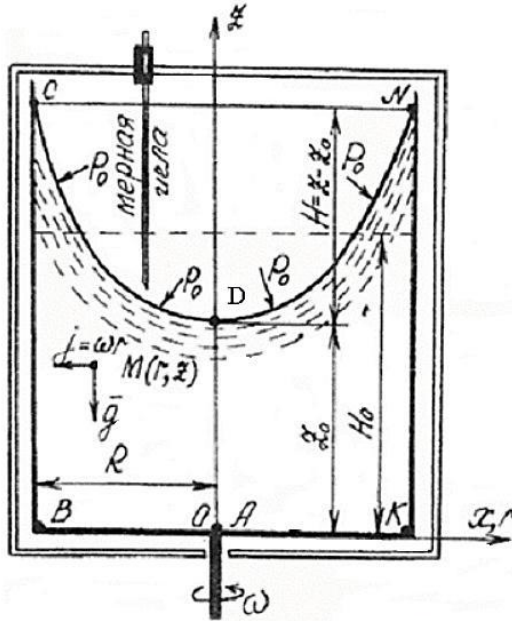


Рис. 10. Схема установки для изучения относительного покоя жидкости во вращающемся относительно вертикальной оси цилиндре

Например: если точка A находится на дне резервуара, совпадая с началом координат, тогда $r = 0$, $z = 0$, по уравнению (19) имеем

$$p_{абсA} = p_0 + \rho g z_0. \quad (20)$$

Если точка B находится на дне резервуара у его боковой стенки (рис. 10), имеем $r = R$, $z = 0$, тогда по уравнению (19)

$$p_{абсB} = p_0 + \rho \frac{\omega^2 R^2}{2} + \rho g z_0. \quad (21)$$

При этом

$$p_{\text{избВ}} = \rho \frac{\omega^2 R^2}{2} + \rho g z_0. \quad (21^*)$$

Изменение давления по вертикали такое же, как и в неподвижном сосуде.

Порядок выполнения работы

Опыт проводится на специальной установке, состоящей из цилиндра 1 с прозрачными стенками из органического стекла, вставленного в обойму 2. Осевой валик 3 обоймы с помощью редуктора соединен с электродвигателем. Число оборотов электродвигателя регулируется реостатом по тахометру. Над цилиндром установлена горизонтальная линейка с передвижной мерной иглой 4. В цилиндр наливается глицерин ($\rho = 1240 \text{ кг/м}^3$) (примерно до половины цилиндра). Замеряется уровень жидкости, H_0 и внутренний радиус сосуда R . Установка включается в сеть. Затем цилиндр приводится во вращение с постоянным числом оборотов n , которое замеряется по тахометру. Когда поверхность жидкости примет установившуюся форму, мерной иглой измеряются координаты нескольких точек на свободной поверхности (CDN , рис. 10).

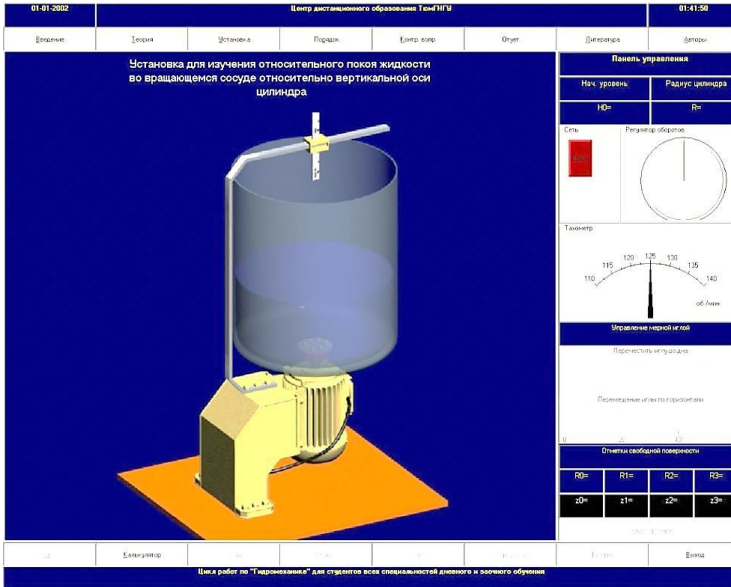


Рис. 11. Основное окно лабораторной работы № 3

1. Установить необходимое число оборотов электродвигателя (регулятор расположен слева от тахометра).
2. Включить установку (клавиша «Вкл.»).
3. Дождаться установления жидкости. Установить мерную иглу на дно (слайдер «Переместить иглу на дно»).
4. Зафиксировать отметку свободной поверхности при первом $R_0=0$, указанном на слайдере «Перемещение иглы по горизонтали».
5. Далее при $R_1=20$, $R_2=40$ и $R_3=60$ так же зафиксировать отметки свободной поверхности (перемещая слайдер «Перемещение иглы по горизонтали»).
6. Данные замеров и расчетов помещаются в таблицу 3.
7. Посмотреть эпюры избыточного гидростатического давления (клавиша «График»).

Таблица 3

№ п/п	Первоначальный уровень жидкости	Скорость вращения цилиндра		Внутренний радиус ци-	Отметки свободной поверхности жидкости при $y=0, x=r, n=const$									
		H_0	n		$\omega_{оп}$	R	z_0	r_0	z_1	r_1	z_2	r_2	z_3	r_3
		мм	об/мин		с ⁻¹	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислить угловую скорость вращения жидкости по показанию тахометра:

$$\omega_{оп} = 2\pi n, \quad (22)$$

где n – обороты в секунду.

2. Рассчитать по (17) угловую скорость вращения $\omega_{расч}$, используя измеренное значение высоты параболоида, равное $H = Z_{ri} - Z_0$.

3. Определить относительную погрешность угловой скорости

$$\delta = \frac{\omega_{расч} - \omega_{оп}}{\omega_{оп}}. \quad (23)$$

4. Построить в масштабе эпюру избыточного гидростатического давления для боковой стенки и дна резервуара в случае:

- абсолютного покоя;
- относительного покоя.

Для этого используют данные табл. 3 и формулы (19), (21) и (21*).

5. Определить силы действия жидкости на боковую стенку и дно резервуара в случае абсолютного и относительного покоя.

Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на жидкость в случаях абсолютного и относительного покоя?

2. Какую форму принимают поверхности равного давления в следующих случаях:

а) когда на жидкость из массовых сил действует лишь сила тяжести (случай абсолютного покоя);

б) при вращении жидкости вместе с сосудом вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью;

в) при прямолинейном движении сосуда с жидкостью: равномерно, с положительным ускорением, с отрицательным ускорением?

3. Что называется, единичной массовой силой?

4. Как определить давление в любой точке жидкости под свободной поверхностью при вращении цилиндра вокруг вертикальной оси?

5. Где в технике применяются закономерности относительного покоя? Какие примеры Вы знаете? Какие параметры можно рассчитать по этим закономерностям?

Лабораторная работа № 4

Изучение режимов течения жидкости (опыт Рейнольдса)

Цель работы:

Визуально изучить качественную картину движения жидкости при ламинарном и турбулентном режимах; по опытным данным вычислить критическую скорость и критическое число Рейнольдса.

При изучении движения вязкой жидкости различают два режима – ламинарный и турбулентный.

Ламинарным режимом называется слоистое движение жидкости. Силы внутреннего трения или вязкости, возникающие между слоями при ламинарном движении, не дают проявиться пульсации скорости отдельных частиц и их переходу в соседние слои.

Турбулентным называется режим, при котором слоистость движения жидкости нарушена, появляется пульсация скорости, вызывающая перемешивание жидких частиц в потоке.

Характеристикой режимов движения служит безразмерное число Рейнольдса

$$R_e = \frac{vd}{\nu}, \quad (24)$$

где v - средняя скорость, м/с; d - характерный линейный размер, диаметр, м; ν - коэффициент кинематической вязкости, см²/с.

Число Рейнольдса R_e , при котором происходит переход ламинарного режима в турбулентный, называется критическим - $R_{кр}$.

Ламинарный режим потока будет устойчивым при числах Рейнольдса меньших критического: для круглых труб при $R_{e\text{кр}d} = 2320$; для потоков некруглой формы или открытых $R_{e\text{кр}e} = 580$.

Экспериментально установлено, что существует два критических числа Рейнольдса: нижнее критическое число Рейнольдса – $R_{e\text{кр}H}$ и верхнее критическое число Рейнольдса – $R_{e\text{кр}B}$.

Если число Рейнольдса, подсчитанное по формуле (24), окажется меньше значения нижнего критического числа, т.е. $R_e < R_{e\text{кр}H}$, то режим будет всегда ламинарным, если же $R_e > R_{e\text{кр}B}$, то режим движения будет всегда турбулентным.

При числах R_e , удовлетворяющих неравенству

$$R_{e\text{кр}H} < R_e < R_{e\text{кр}B},$$

режим может быть либо ламинарным, либо турбулентным, в зависимости от предыстории движения жидкости. Однако при указанных числах R_e ламинарный режим движения неустойчивый, малейшие возмущения, вносимые в ламинарный поток жидкости (например, сотрясение трубы), не затухают и приводят к смене режима на турбулентный.

Потери напора h_l по длине трубы при ламинарном движении пропорциональны скорости в первой степени $h_l = k_1 \cdot v_1$, где k_1 - коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров трубы и свойств жидкости.

При развитом турбулентном режиме потери h_l пропорциональны квадрату скорости: $h_l = k_1 \cdot v^2$. В переходной области сопротивления (от докватричной к квадратичной), когда касательные напряжения в потоке от сил вязкости соизмеримы с напряжениями от пульсаций скорости, вызывающей перемешивание, потери напора h_l пропорциональны скорости в степени выше первой, но ниже второй.

Существование ламинарного и турбулентного режимов движения можно проиллюстрировать опытом (вошедшим в историю как классический опыт Осборна Рейнольдса) на лабораторной установке (рис. 12).

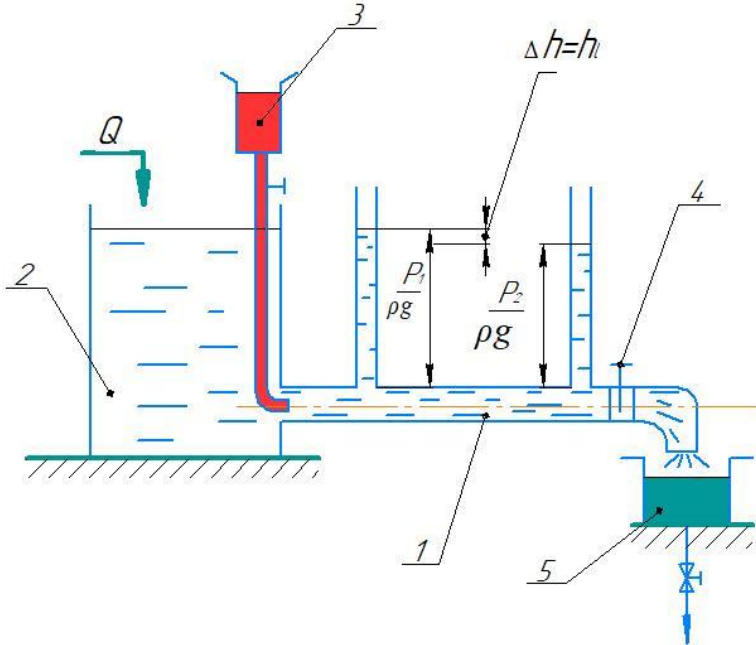


Рис. 12. Установка для изучения режимов движения жидкости

Для визуального наблюдения режимов течения на стеклянной трубе 1, по которой движется вода, в основной поток наводится подкрашенная струйка жидкости из сосуда 3. В качестве подкрашенной жидкости используется слабый раствор марганца (нигрозина), подбирая его плотность приблизительно равной плотности воды во избежание гравитационного перемешивания.

Установившееся движение осуществляется поддержанием в сосуде 2 постоянного напора путем излива лишней воды. Скорость течения воды в трубе регулируется краном 4. Подкрашенная жидкость вытекает по капиллярной трубке и вводится в основной поток через иглу. Подача подкрашенной жидкости регулируется таким образом, чтобы скорости цветной струйки и воды в трубе были примерно одинаковыми.

При очень малых скоростях течения цветная струйка на всем протяжении трубы 1 не перемешивается с основным потоком. Плавным увеличением скорости от нуля до максимального значения можно уловить момент, когда подкрашенная струйка размывается и жидкость по всему сечению трубы оказывается окрашенной. Это и есть переход от ламинарного режима к турбулентному.

Опыт О. Рейнольдса является классическим примером диалектического закона перехода количества в качество. Здесь количественные изменения скорости (увеличение или уменьшение) приводят в новое качество движения (смена ламинарного режима турбулентным или турбулентного ламинарным).

Установка О. Рейнольдса может быть использована не только для визуального наблюдения режимов движения, но и для определения количественных зависимостей. Разность показаний пьезометров, установленных в начале и конце стеклянной трубы, определяет потерю напора на рассматриваемом участке.

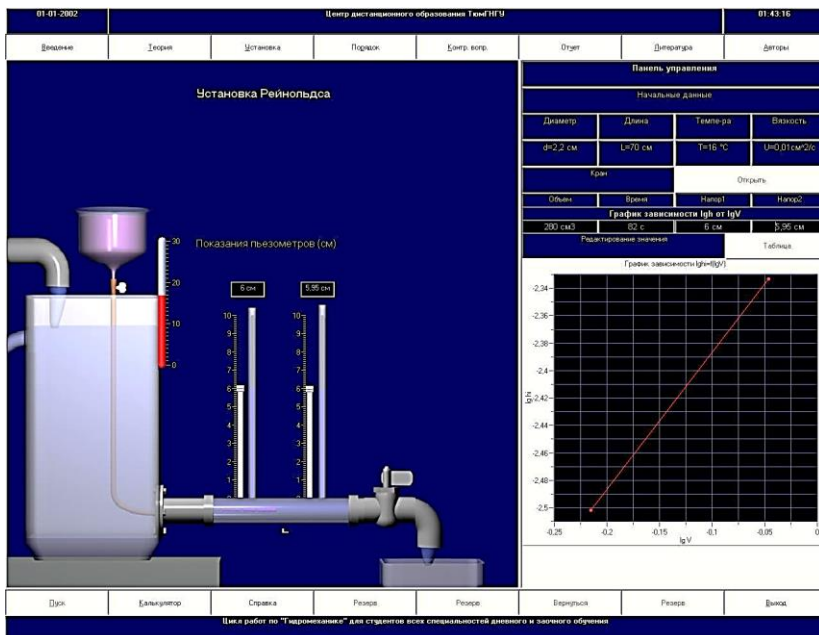


Рис. 13 Основное окно лабораторной работы № 4

Порядок выполнения работы

1. Постепенно открывать кран на установке (нажать клавишу «Открыть»). Открытие крана происходит автоматически, при этом все значения автоматически заносятся в таблицу, синхронно снятию результатов строится график.
2. Перенести в отчет данные из таблицы. Просмотр таблицы осуществляется с помощью кнопки «Таблица». В таблице фиксируются измеренные параметры (рисунок 14.)

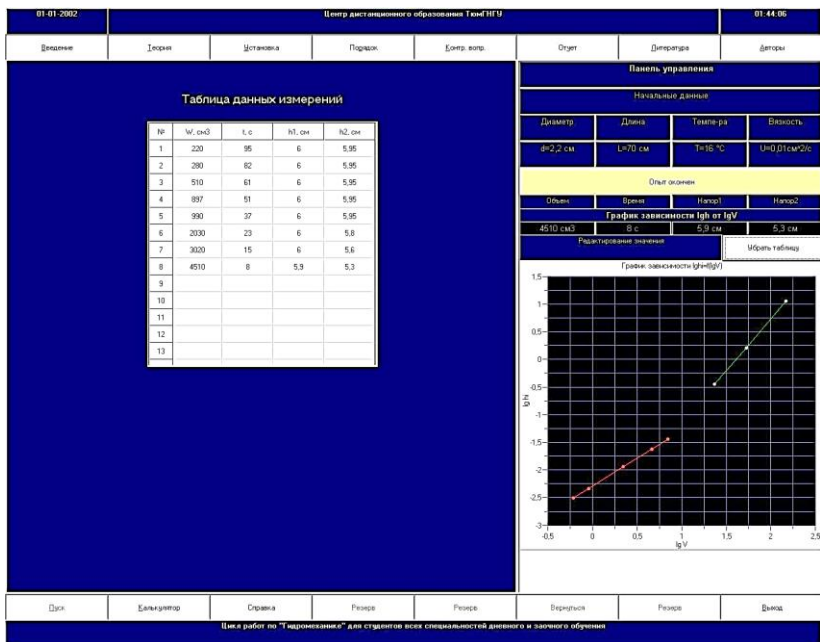


Рис. 14 Таблица данных измерений.

3. Для качественной оценки режимов движения жидкости необходимо провести замеры пьезометрических напоров $P_1/(\rho g)$, $P_2/(\rho g)$ по пьезометрам, установленным в начале и конце стеклянного трубопровода, объем протекающей жидкости W за время τ с визуальным фиксированием состояния подкрашенной струйки. Измерить температуру воды в опыте для расчета кинематической вязкости воды. Данные измерений занести в таблице 4

Таблица 4

$d = \text{см}, t_{\text{воды}} = \text{°C}, \nu_{\text{воды}} = \text{см}^2/\text{с}$											
Опытные данные						Расчетные данные					
№ п/п	W	τ	h_1	h_2	Режим течения наблю- даемый	Q	ν	h_l	$l g \nu$	$l g h_l$	Re
	см ³	с	см	см		см ³ /с	см/с	см			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											

Изменяя расход в трубопроводе, а, следовательно, и скорость движения жидкости ν , можно найти зависимость $h_l = f(\nu)$. Если на логарифмической сетке (рисунок 14) по оси абсцисс отложить значения $l g \nu$, а по оси ординат - соответствующие значения $l g h_l$, то, соединив опытные точки, получим две прямые линии ab и cd . Линия ab соответствует ламинарному режиму, а cd - турбулентному. Точка пересечения прямых e определяет критическую скорость течения жидкости в круглой трубе $\nu_{\text{кр}}$, что дает возможность определить критическое число Рейнольдса $Re_{\text{кр.оп}}$:

$$Re_{\text{кр.оп}} = \frac{\nu_{\text{кр}} d}{\nu}$$

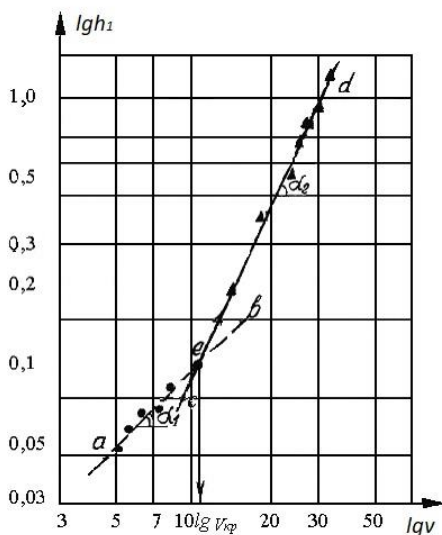


Рис. 14 График зависимости $lg h_1$ от $lg v$

● – ламинарный режим; ▲ – турбулентный режим.

Обработка экспериментальных данных

Используя данные таблицы 4 определить:

1. Расход воды

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (25)$$

2. Скорость течения воды в трубе диаметром $d=2r$

$$v = \frac{Q}{\pi r^2}. \quad (26)$$

3. Кинематическую вязкость воды по таблицам, графикам или по формуле Пуазейля по известной температуре t в $^{\circ}\text{C}$:

$$\nu = \frac{0,0178}{(1+0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2)}, \text{Ст} \quad (27)$$

4. Потери напора по длине трубы при $z_1 = z_2$:

$$h_1 - h_2 = \Delta h = h_l = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}, \quad (28)$$

5. Построить в логарифмических координатах график зависимости $h_l = f(V)$.

6. Найти по графику $h_l = f(V)$ значение $lg V_{кр}$ и критическую скорость $V_{кр}$.

7. Определить критическое число Рейнольдса по формуле (24)/

8. Определить относительную погрешность эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Какими характерными особенностями отличаются режимы движения?

2. Как объяснить, что потери напора при ламинарном режиме движения жидкости в трубах пропорциональны скорости в первой степени, а в турбулентном движении – во второй?

3. Чем вызвано расхождение результатов опыта и теории?

4. Для чего и каким образом в лабораторной работе поддерживается установившееся движение жидкости?

5. От чего зависит число Рейнольдса?

6. Как влияет температура перекачиваемой жидкости на режим движения жидкости, длину трубы, а также ее диаметр?

Лабораторная работа № 5

Исследование уравнения Бернулли

Цель работы:

1. На напорном трубопроводе переменного сечения проследить по пьезометрам переход удельной энергии в потоке из потенциальной в кинетическую энергию и обратно в соответствии с уравнением Даниила Бернулли.
2. По опытным данным построить пьезометрическую и напорную линии для целого потока.

Уравнение Даниила Бернулли, полученное в 1738 г., является фундаментальным уравнением гидродинамики. Оно дает связь между давлением P , средней скоростью v и пьезометрической высотой z в различных сечениях потока и выражает закон сохранения энергии движущейся жидкости. С помощью этого уравнения решается большой круг задач.

Уравнение Бернулли для установившегося плавно изменяющегося потока вязкой жидкости имеет вид

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w. \quad (29)$$

Все члены уравнения имеют линейную размерность:

z - высота центра тяжести сечения над плоскостью сравнения, геометрический напор;

$\frac{P}{\rho g}$ - пьезометрическая высота (напор);

$\frac{\alpha v^2}{2g}$ - скоростной напор, где α - коэффициент Кориолиса, характеризующий неравномерность местных скоростей по живому сечению потока;

h_w - величина суммарных потерь напора между сечениями 1 и 2.

Уравнение Бернулли является аналитическим выражением закона сохранения энергии в потоке жидкости.

Если на участке потока уменьшается скорость (кинетическая энергия), то, согласно уравнению Бернулли, на этом участке должно соответственно возрасти давление (потенциальная энергия).

Наглядно уравнение Бернулли интерпретируется в опытах на установке, представляющей собой участок напорного трубопровода переменного сечения, к которому в характерных точках присоединены пьезометры. Каждый пьезометр показывает давление или гидростатический напор $z + \frac{P}{\rho g}$ (плоскость сравнения $O-O$ параллельна оси трубопровода и ($z_1 = z_2 = z_3 = \dots = z_n = 0$)).

Полный напор или полная удельная энергия $z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = e$ непрерывно уменьшается по течению, т.к. часть его затрачивается на преодоление сопротивлений. Разность полных напоров в начале и в конце трубопровода дает величину потерь на рассматриваемом участке:

$$h_w = e_1 - e_2$$

Экспериментальная установка представляет собой участок напорного трубопровода переменного сечения (рис. 5.15), который присоединен к напорному баку (на рисунке не показан). Вода из напорной трубы поступает в мерный бак. Расход контролируется с помощью крана.

Для измерения давления в характерных сечениях трубы установлены статистические пьезометры (1-9).

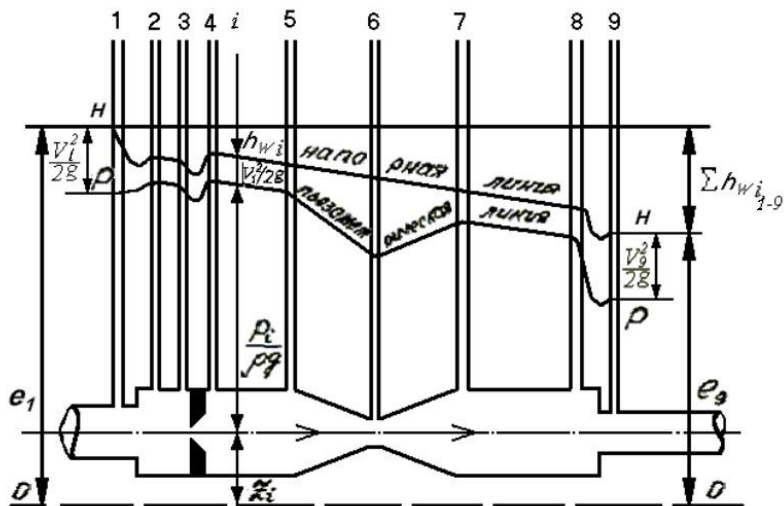


Рис. 15 Установка для демонстрации уравнения Бернулли

Порядок выполнения работы

Через трубопровод пропускается постоянный расход воды, который измеряется объемным способом $Q = \frac{W}{\tau}$, где W - объем воды за время τ . По показаниям пьезометров 1-9 определяется гидростатический напор (потенциальная удельная энергия $z + P/(\rho g)$). По полученным значениям $z + P/(\rho g)$ строится пьезометрическая линия. Для построения напорной линии необходимо рассчитать значение удельной кинетической энергии (скоростного напора) в рассматриваемых сечениях потока. Скоростной напор $v^2/(2g)$ вычисляется по средней скорости $v = \frac{Q}{\omega}$, где ω - площадь рассматриваемого сечения с учетом $\alpha = 1$. Откладывая значения скоростного напора от гидростатического напора вверх, получим линию полной удельной энергии потока (напорную линию).

Полученный график (рис. 15) называется диаграммой уравнения Бернулли, которая показывает характер изменения потенциальной и полной удельной энергий потока при переходе от одного сечения к другому.

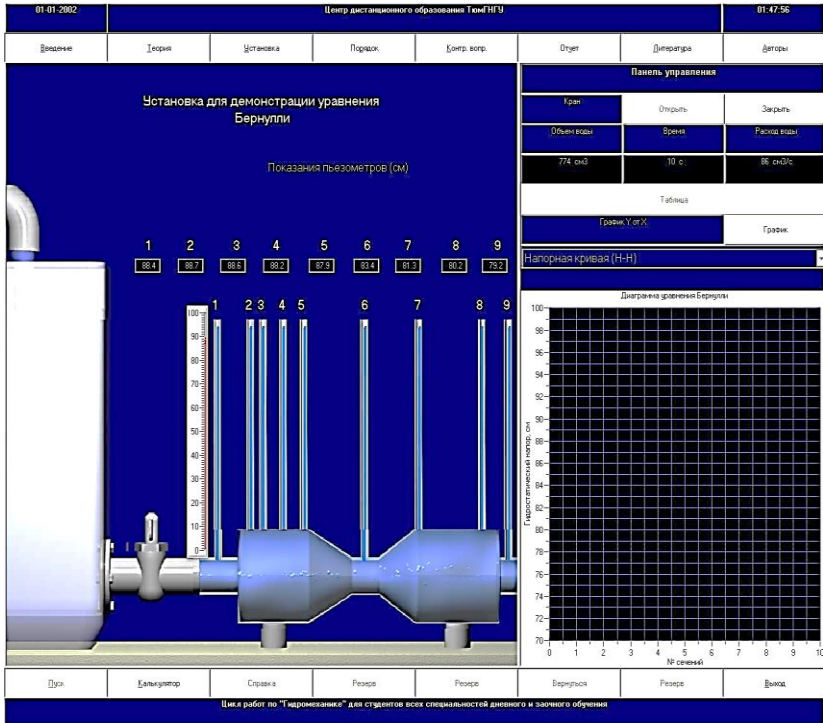


Рис.16 Основное окно лабораторной работы № 5

1. Открыть кран (нажать клавишу «Открыть»). При этом все снимаемые показания и расчетные данные автоматически вносятся в таблицу.
2. Через несколько секунд закрыть кран (нажать клавишу «Закрыть»).

3. Перенести в отчет данные из таблицы. Просмотр таблицы осуществляется с помощью клавиши «Таблица».

4. Перенести отчет в график (просмотр графика осуществляется с помощью списка «Пьезометрическая кривая» и «Напорная кривая»). Тип линии выбирается в окне списка.

Данные опыта и результаты расчетов занести в таблицу 5.

Таблица 5

№ сечений	Диаметр	Площадь	Объем воды	Время	Гидростатический напор	Расход	Скорость	Скоростной напор	Полная удельная энергия
	d	ω	W	τ	$z + P/(\rho g)$	Q	v	$v^2/(2g)$	e
	см	см ²	см ³	с	см	см ³ /с	см/с	см	см
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

По результатам таблицы 5 в масштабе на миллиметровой бумаге строится пьезометрическая (P - P) и напорная (H - H) линии (рис. 15).

Контрольные вопросы

1. Как меняется удельная потенциальная энергия: при сужении потока; при расширении потока?
2. Как ведет себя напорная линия в тех же условиях?
3. Изменится ли положение пьезометрической линии, если в опыте реальную жидкость заменить идеальной?
4. Может ли пьезометрическая линия опускаться ниже оси трубопровода, о чем это говорит?
5. Что характеризует расстояние по вертикали от пьезометрической линии до напорной; от пьезометрической линии до плоскости сравнения; от пьезометрической линии до центра тяжести живого сечения трубопровода?
6. Может ли напорная линия располагаться ниже пьезометрической? Почему?

Лабораторная работа № 6

Определение коэффициента гидравлического сопротивления по длине трубопровода при напорном движении жидкости

Цель работы:

1. Определить коэффициент Дарси λ (коэффициент гидравлического сопротивления) опытным путем для трубопровода при различных скоростях движения воды.
2. Сравнить значения коэффициентов сопротивлений, полученные из опыта $\lambda_{\text{оп}}$, с вычисленными по соответствующим формулам $\lambda_{\text{т}}$.

При движении жидкости в трубах происходит потеря напора на преодоление сопротивлений движению (следствие работы сил трения). Потери напора могут быть получены из уравнения Бернулли, где h_w - суммарные потери напора между выбранными сечениями, h_m - потери напора на местные сопротивления, h_l - потери напора по длине

$$h_w = h_l + h_m.$$

Для горизонтального трубопровода постоянного сечения, на котором отсутствуют местные сопротивления, уравнение примет вид

$$h_w = h_l = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}. \quad (30)$$

Из выражения следует, что можно экспериментально определять потери напора по длине потока, измерив давления P_1 и P_2 .

Для вычисления потерь напора по длине при движении жидкости по трубам пользуются формулой Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (31)$$

где λ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления трению;

d – внутренний диаметр трубопровода;

v – средняя скорость движения;

l – длина потока;

g – ускорение свободного падения.

Как показывают опыты, величина λ в самом общем случае зависит от диаметра трубопровода, скорости движения жидкости, плотности и вязкости жидкости и величины абсолютной шероховатости

$$\lambda = f(d; v; \rho; \mu; \Delta),$$

а на основании теории подобия и анализа размерностей было установлено, что коэффициент λ является функцией числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости.

Коэффициент гидравлического трения λ в общем случае зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости $\bar{\Delta}$, т.е.

$$\lambda = f(Re; \bar{\Delta}) \quad (32)$$

здесь $\bar{\Delta} = \frac{\Delta_э}{d}$, где $\Delta_э$ – эквивалентная шероховатость.

При турбулентном потоке даже мелкие препятствия могут стать источником вихревого движения жидкостей. Они приводят к возрастанию точечных гидравлических сопротивлений, которые в ламинарном потоке настолько малы, что не заслуживают внимания. Препятствиями в данном случае считаются царапины, заусеницы, бугорки и т.п. на стенках трубопровода. В гидравлике

они называются выступами шероховатости. Проблема данного вида может быть абсолютной или относительной:

Абсолютная шероховатость труб (Δ , мм) зависит от средней высоты бугорков, которые располагаются на внутренних стенках магистрали. Здесь имеет значение качество изготовления, условия эксплуатации и материал конструкции. Данный показатель не оказывает влияния на потерю напора, поскольку не связан с поперечными размерами потока.

Относительная шероховатость труб (Δ/d , мм) – это отношение величины абсолютной шероховатости к диаметру трубопровода. Этот показатель сказывается на величине потери напора.

Помимо двух основных видов существует также понятие *эквивалентной шероховатости* ($\Delta_э$, мм) стальных труб, которая искусственно создается бугорками одинаковой высоты по всей длине трубопровода. При ее определении диаметр зерен подбирается так, чтобы в местах квадратичного сопротивления коэффициент по величине был равен коэффициенту при естественной неровности внутренней поверхности сетей.

На заметку! Данный показатель определяется экспериментально, берется из справочных таблиц или вычисляется по приближенной формуле. Как он сказывается на величине гидравлического сопротивления, зависит от диаметра коллектора.

Трубы называют *гидравлически гладкими*, если шероховатость не влияет на их гидравлическое сопротивление. Для них используют эмпирические формулы:

– формулу П.К. Конакова для диапазона изменения критерия Рейнольдса от критического до нескольких миллионов

$$\lambda_r = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg R_e - 1,5)^2}$$

– формулу Блазиуса для $2300 < Re < 10^5$

$$\lambda_T = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}.$$

К гидравлически гладким трубам относят цельнотянутые трубы из цветных металлов, а также стальные высококачественные бесшовные трубы.

Гидравлически шероховатые трубы - толщина ламинарного слоя меньше высоты выступов шероховатости. В этом случае шероховатость стенок влияет на характер движения и соответственно потери напора зависят от шероховатости.

При ламинарном режиме движения жидкости ($Re < 2320$) λ зависит только от числа Re и определяется по формуле Стокса

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (33)$$

При турбулентном режиме движения существуют три зоны, в которых законы сопротивления различны.

Первая зона называется зоной гидравлически гладких труб (или зона Блазиуса). Здесь λ зависит только от числа Re и определяется по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (34)$$

Эта формула применима для чисел $Re_{enpl} > Re > 2320$, где Re_{enpl} - первое предельное число Рейнольдса, которое может быть определено по формуле

$$Re = \frac{10d}{\Delta_3}. \quad (35)$$

Вторая зона – зона смешанного трения. Здесь λ зависит как от числа Re , так и от относительной шероховатости Δ . Для этой зоны можно пользоваться формулой Альштуля (или любой другой для данной зоны)

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \bar{\Delta} \right)^{0,25}. \quad (36)$$

Эта формула применима для чисел: $Re_{np1} < Re < Re_{np2}$, где Re_{np2} - второе предельное число Re , которое может быть определено по формуле

$$Re = \frac{500 \cdot d}{\Delta_3}. \quad (37)$$

Третья зона – зона вполне шероховатых труб, когда $Re > Re_{np2}$. Здесь λ зависит только от относительной шероховатости Δ и определяется по формуле Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \cdot (\bar{\Delta})^{0,25} \quad (38)$$

На рисунке 17 показана схема экспериментальной установки, состоящей из горизонтального трубопровода постоянного сечения – l , на котором установлены два пьезометра на расстоянии l . Расход воды регулируется запорными вентилями 2 (начало и конец трубопровода). Измерение расхода осуществляется с помощью мерного бака 3 объемным способом.

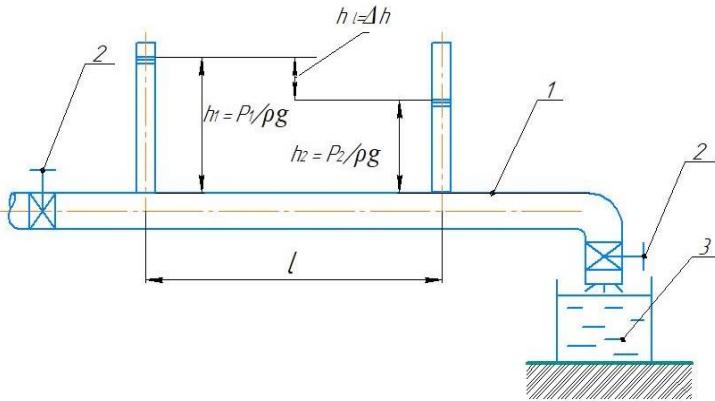


Рис. 17. Схема установки для определения коэффициента гидравлического трения λ

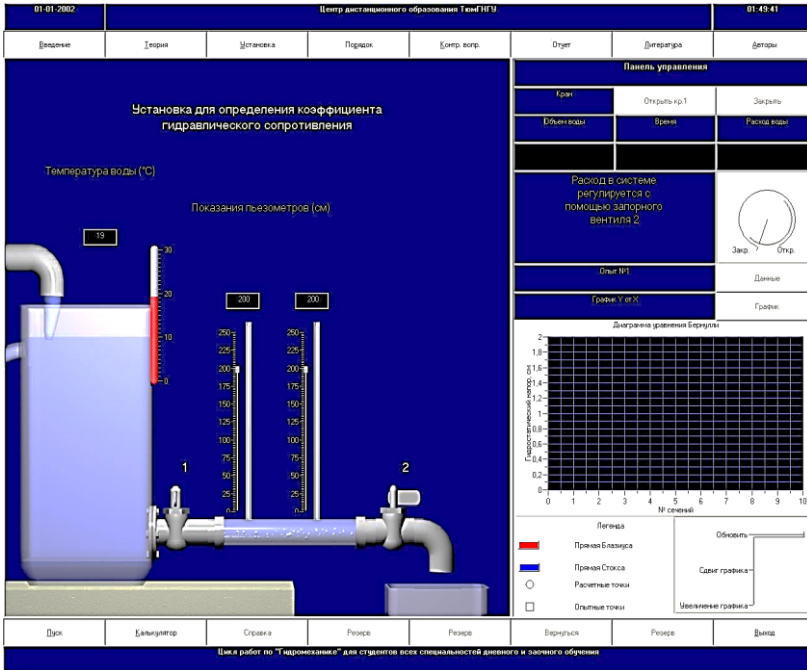


Рис. 18 Основное окно лабораторной работы № 6

Порядок выполнения работы

1. Открыть вентиль 2 (нажать клавишу «Открыть») и установить некоторый постоянный расход. При этом все снимаемые показания и расчетные данные автоматически заносятся в таблицу.
2. Через несколько секунд кран закрыть (нажать клавишу «Закреть»).
3. Снять показания пьезометров и замерить объем воды в мерном баке за время t .
4. Измерить температуру воды.

5. Изменить расход в системе при помощи запорного вентиля и все измерения повторить; необходимое количество опытов 6...8.

6. Перенести в отчет данные из таблицы. Просмотр таблицы осуществляется с помощью клавиши «Таблица».

Данные опыта и результаты расчетов занести в таблицу 6.

Таблица 6

№ п/п	$d = \text{--- см}; t = \text{---}^{\circ}\text{C}; \nu = \text{--- см}^2/\text{с}; L = \text{--- см}; g = 981 \text{ см}/\text{сек}^2; \Delta \varepsilon = 0,01 \text{ мм}$													
	Опытные данные				Результаты обработки данных									
	W	τ	h_1	h_2	Q	V	h_1	$\lambda_{оп}$	$\frac{T}{(100\lambda_{оп})}$	Re	$lgRe$	$\lambda_{расч}$	lg $(100\lambda_{расч})$	
	см^3	с	см	см	$\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$	$\text{см}/\text{с}$	см	-	-	-	-	-	-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														

План обработки экспериментальных данных:

1. Определить расход воды:

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (39)$$

2. Определить среднюю скорость движения воды в трубопроводе:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}. \quad (40)$$

3. Найти по формуле Пуазейля кинематическую вязкость воды

$$\nu = \frac{0,000183}{(1+0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2)}, \quad (41)$$

где t - температура воды в градусах Цельсия.

4. По известным значениям ν и v определить число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu}. \quad (42)$$

5. Определить потери напора по длине h_1 используя показания пьезометров

$$h_1 = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (43)$$

6. Определить опытное значение коэффициента гидравлического трения

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{h_1 \cdot 2gd}{v^2 \cdot L}. \quad (44)$$

7. Определить расчетные значения коэффициента гидравлического трения $\lambda_{\text{расч}}$ по формулам при $\Delta_3 = 0,1 \text{ мм}$ и сравнить с опытными значениями) $\lambda_{\text{оп}}$. Расчетные данные занести в таблицу 6.

8. Построить график зависимости ($\lg 100\lambda$) от $\lg Re$ (рисунок 19)

9. Сделать выводы о проделанной работе, оценив степень совпадения расчетных и опытных значений коэффициентов Дарси по среднеквадратическому отклонению опытного коэффициента $\lambda_{\text{оп}}$ от расчетного по формулам $\lambda_{\text{расч}}$.

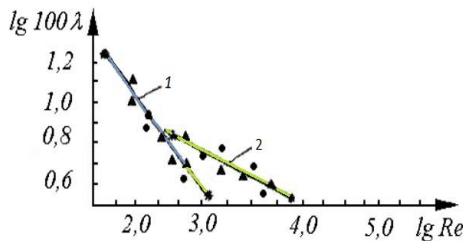


Рис.19 Зависимость $\lg 100\lambda$ от $\lg Re$

(▲ – опытные точки, ● – расчетные точки; 1 – прямая Стокса, 2 – прямая Блазиуса)

Контрольные вопросы

1. Какие причины вызывают возникновение потерь напора по длине?
2. Каков физический смысл коэффициента Дарси и его связь с напряжением трения на стенке трубы?
3. Как определяются потери напора по длине? Запишите формулу Дарси – Вейсбаха.
4. Чем определяется величина коэффициента Дарси?
5. Что называется, абсолютной, относительной и эквивалентной шероховатостью? Что такое искусственная шероховатость?
6. Какие зоны трения Вы знаете? Чем они отличаются?
7. Какие трубы называются гидравлически гладкими, гидравлически шероховатыми? Может ли быть таковой одна и та же труба?
8. От каких факторов зависит толщина вязкого подслоя? Как она изменяется с изменением скорости течения жидкости, вязкости?
9. Какая зона называется квадратичной? Почему?
10. Объясните появление «седла» на графике Никурадзе (в зоне смешанного трения).
11. Влияет ли изменение диаметра трубы на потери напора при постоянном расходе жидкости:
 - а) в ламинарном режиме;
 - б) в зоне гидравлически гладких труб.

Лабораторная работа № 7

Определение коэффициентов местных сопротивлений

Цель работы:

Определить опытным путем величины коэффициентов местных сопротивлений (ξ) в напорном трубопроводе и сравнить полученные значения с данными, приведенными в справочнике.

При движении жидкости по трубопроводу часть энергии (напора) теряется на преодоление гидравлических сопротивлений, вызванных установкой трубопроводной арматуры (внезапное сужение, внезапное расширение, тройник, крестовина, колена, кран, вентиль, задвижка, диафрагма и т.д.). Эти гидравлические сопротивления называются местными, а потери энергии на них местными потерями.

Особенностью местных сопротивлений является наличие при турбулентном режиме вихревых зон (рис. 20) и деформации эпюры скоростей.

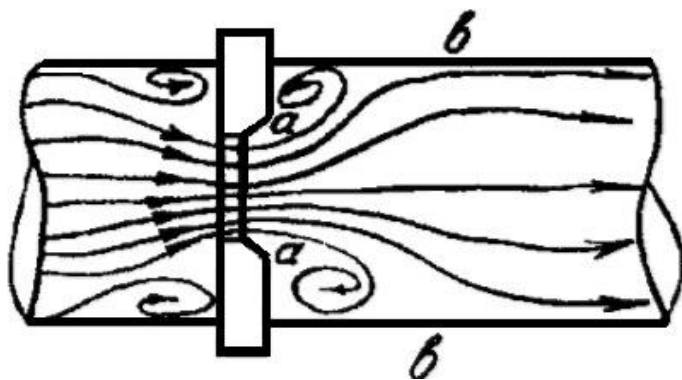


Рис. 20. Кинематическая структура потока в зоне местного сопротивления диафрагмы

Транзитный поток отделен от вихревой зоны осредненной во времени и пространстве поверхностью раздела ab . Транзитная струя в области вихревой зоны неустойчива. Поэтому поверхность раздела ab является зоной интенсивного вихреобразования и перехода механической энергии в тепловую. В виду большой сложности явлений, происходящих в жидкости, протекающей через местное сопротивление, только в отдельных случаях коэффициент ξ может быть найден теоретически. В преобладающем большинстве случаев ξ определяется опытным путем. Исследования, проведенные учеными, показали, что зависимость коэффициента ξ от Re наблюдается при ламинарном режиме движения жидкости. В турбулентном потоке влияние числа Re на коэффициент ξ весьма незначительно. При практических расчетах в области турбулентного режима движения этот коэффициент зависит только от вида и конструктивного выполнения местного сопротивления.

При экспериментальных исследованиях потери энергии (напора) определяются из уравнения Бернулли при условии $h_m \neq 0$, $h_l = 0$.

$$h_i = e_1 - e_2 = \left(z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (45)$$

где $e_1 = \left(z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right)$ - полная удельная энергия потока перед местным сопротивлением.

$e_2 = \left(z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right)$ - полная удельная энергия потока после местного сопротивления.

Местные сопротивления вызываются фасонными частями, арматурой, другим оборудованием трубопроводных сетей, которые изменяют величину или направление скорости движения

жидкости на отдельных участках, что всегда связано с появлением дополнительных потерь напора.

Потери напора на местных сопротивлениях определяются по формуле Вейсбаха

$$h_m = \xi_m \frac{v_1^2}{2g}. \quad (46)$$

Величина коэффициента местного сопротивления определяется по формуле

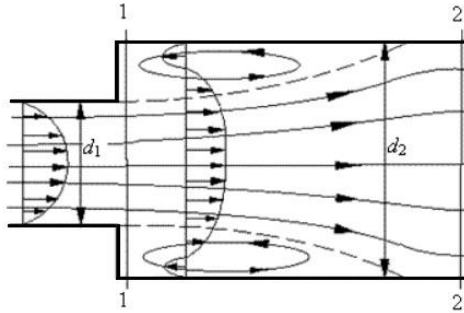
$$\xi_m = \frac{h_m 2g}{v_1^2}. \quad (46^*)$$

Местные гидравлические сопротивления

Коэффициенты потерь ξ при турбулентном течении определяются в основном формой местных сопротивлений и очень мало изменяются с изменением абсолютных размеров русла, скорости потока и вязкости жидкости, т.е. с изменением числа Re , поэтому обычно понимают, что они не зависят от Re , что означает квадратичный закон сопротивления, или автомодельность.

Основные виды местных потерь напора можно условно разделить на следующие группы:

- потери, связанные с изменением живого сечения потока (резкое или постепенное расширение и сужение потока);
- потери, вызванные изменением направления потока, его поворотом (поворот трубы);
- потери, связанные с протеканием жидкости через арматуру различного типа (вентили, краны, клапаны, сетки);
- потери, возникшие вследствие отделения одной части потока от другой или слияния двух потоков (тройники, крестовины и т.д.).

Внезапное расширение русла.

Коэффициент потерь для внезапного расширения

$$\xi = \left(\frac{1 - S_1}{S_2} \right), \quad (47)$$

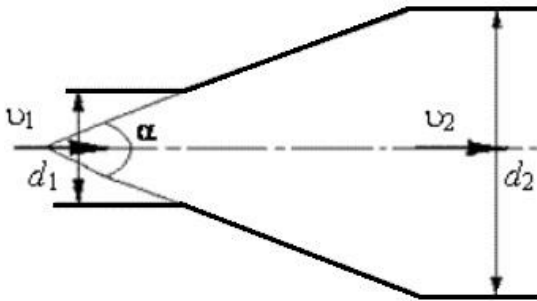
здесь S_1 , S_2 – площади живых сечений потока перед расширением и после расширения,

Если принять ряд допущений, то теоретически можно доказать, что потери напора при резком расширении (формула Борда)

$$h_i = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}, \quad (48)$$

где v_1 и v_2 – средние скорости в трубе до расширения и после. Эту формулу можно привести к другому виду:

$$h_i = \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g}. \quad (49)$$

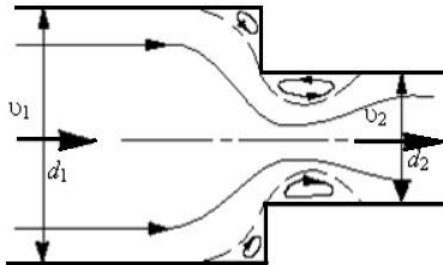
Постепенное расширение.

Если расширение происходит постепенно, то потери напора значительно уменьшаются. При течении жидкости в диффузоре скорость потока постепенно уменьшается, уменьшается кинетическая энергия частиц, но увеличивается градиент давления. При некоторых значениях угла расширения α частицы у стенки не могут преодолеть увеличивающееся давление и останавливаются. При дальнейшем увеличении угла частицы жидкости могут двигаться против основного потока, как при резком расширении. Происходит отрыв основного потока от стенок и вихреобразование. Интенсивность этих явлений возрастает с увеличением угла α и степенью расширения $n = S_2/S_1$.

Потерю напора в диффузоре можно условно рассматривать как сумму потерь на трение и расширение. При небольших углах возрастают потери по длине, а сопротивление на расширение становится минимальным. При больших углах наоборот возрастает сопротивление на расширение. Коэффициент сопротивления диффузора можно определить по следующей формуле

$$\xi_{\text{диф}} = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + \sin \alpha \left(1 - \frac{1}{n^2}\right). \quad (50)$$

Внезапное сужение



При внезапном сужении потока также образуются водоворотные зоны в результате отрыва от стенок основного потока, но они значительно меньше, чем при резком расширении трубы, поэтому и потери напора значительно меньше. Коэффициент местного сопротивления на внезапное сужение потока можно определить по формуле

$$\xi_{\text{вс}} = 0,5(1 - n), \quad (51)$$

где $n = S_2/S_1$ – степень сужения.

В случае присоединения трубы к резервуару можно принять $S_1 = \infty$, тогда $\xi_{\text{вс}} = 0,5$.

Постепенное сужение (конфузор)

Величина сопротивления конфузора будет зависеть от угла конусности конфузора θ . Данное местное сопротивление представляет собой коническую сходящуюся трубу, которая называется *конфузором*. Течение жидкости в конфузоре сопровождается увеличением скорости и падением давления. В конфузоре имеются лишь потери на трение

$$h_{\text{конф}} = \frac{\lambda}{8 \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_2^2}{2g}, \quad (52)$$

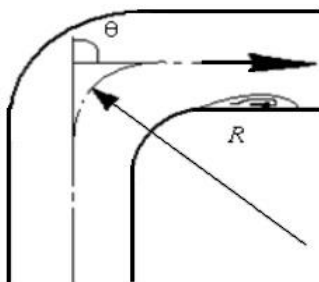
где коэффициент сопротивления конфузора определяется по формуле

$$\xi_{\text{конф}} = \frac{\lambda}{8 \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right), \quad (53)$$

в которой $n = S_2/S_1$ – степень сужения.

Небольшое вихреобразование и отрыв потока от стенки с одновременным сжатием потока возникает лишь на выходе из конфузора в месте соединения конической трубы с цилиндрической. Закруглением входного угла можно значительно уменьшить потерю напора при входе в трубу. Конфузор с плавно сопряженными цилиндрическими и коническими частями называется *соплом*.

Поворот трубы (колени)



В результате искривления потока на вогнутой стороне внутренней поверхности трубы давление больше, чем на выпуклой. В связи с этим жидкость движется с различной скоростью, что способствует отрыву от стенок пограничного слоя и потерям напор. Величина коэффициента местного сопротивления ξ_k зависит от угла поворота θ , радиуса поворота R , формы поперечного сечения и приводится в справочниках. Для круглого сечения трубы при $\theta = 90^\circ$. коэффициент сопротивления можно определить по формуле

$$\xi_k = 0,05 + 0,2 \frac{d}{R}. \quad (54)$$

Другие виды местных сопротивлений.

Коэффициенты местных сопротивлений для большинства сопротивлений приводятся в справочниках, их величина зависит от конструкции. Для ориентировочных расчетов можно пользоваться следующими коэффициентами местного сопротивления:

- задвижка при полном открытии – 0,15;
- вход в трубу при острых кромках – 0,5;
- вентиль с косым затвором при полном открытии – 3;
- симметричный тройник – 1,5.

В качестве экспериментальной установки используется трубопровод переменного сечения для демонстрации уравнения Бернулли (Лабораторная работа № 5). Вид местного сопротивления задается каждому студенту (группе студентов) индивидуально: внезапное сужение, внезапное расширение, диафрагма, плавное сужение, плавное расширение.

Измерение расходов производится объемным способом с помощью мерного бака и секундомера. Для измерения давлений перед и после местного сопротивления служат пьезометры или дифманометры.

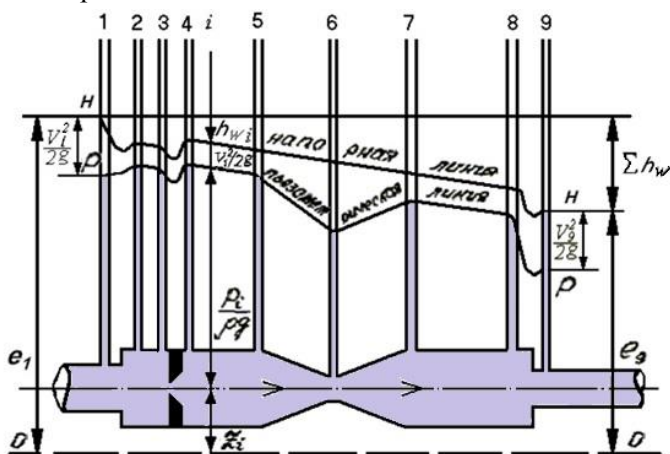


Рис. 21 Установка для проведения опытов

Порядок выполнения работы

1. Установка приводится в рабочее состояние, для чего запорными вентилями устанавливается какой-либо постоянный расход в системе.

2. Открыть вентиль 2 (нажать клавишу «Открыть») и установить некоторый постоянный расход. При этом все снимаемые показания и расчетные данные автоматически заносятся в таблицу.

3. Через несколько секунд кран закрыть (нажать клавишу «Заккрыть»).

4. Снять показания пьезометров и замерить объем воды в мерном баке за время t .

5. Замеряется температура воды в мерном баке.

6. Повторить опыт при расходах, близких к первоначальному.

На рисунке 22 показан процесс работы установки, на рисунке 23 представлены данные опыта.

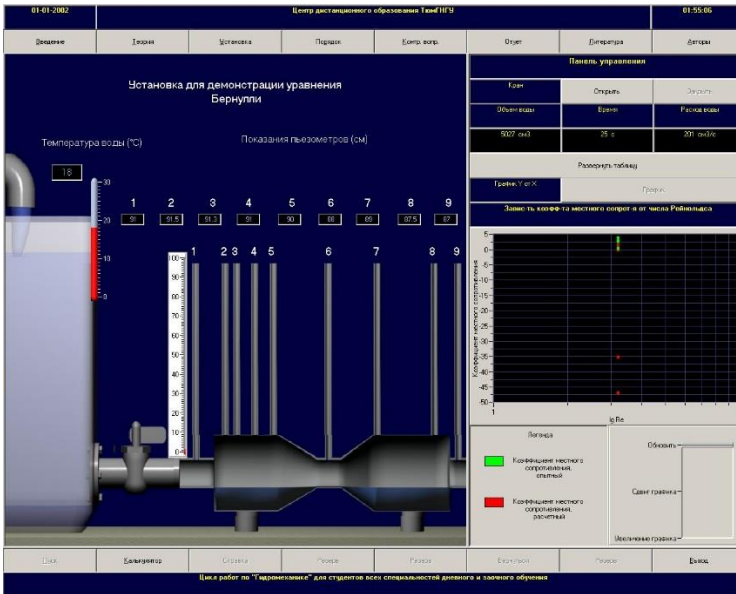


Рис. 22 Основное окно лабораторной работы № 7

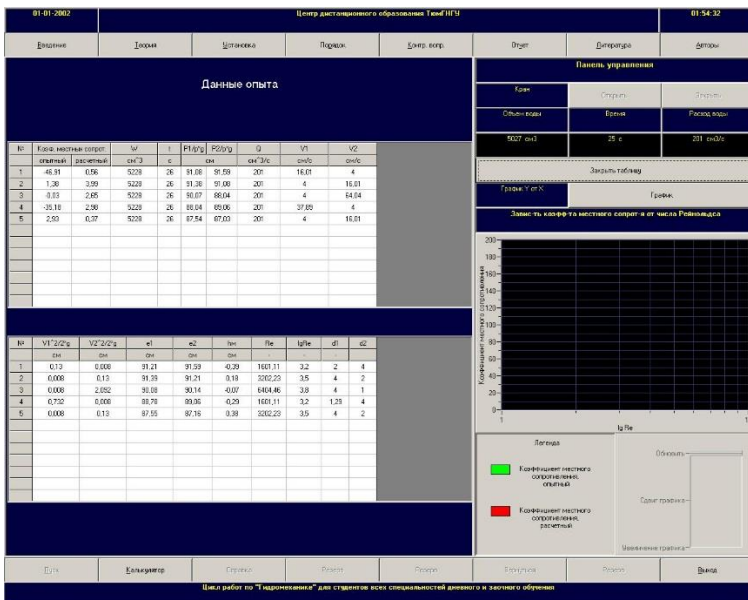


Рис. 23 Окно таблицы данных экспериментальных данных.

Обработка экспериментальных данных

1. По известному объему воды за время τ определить расход воды.

2. По измеренной температуре определить кинематическую вязкость воды.

3. Определить среднюю скорость в требуемых сечениях скоростные напоры $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

4. Определить полные напоры в требуемых сечениях местного сопротивления и потери напора на нем: $h_m = e_1 - e_2$.

5. Вычислить коэффициент местного сопротивления $\xi_{\text{оп}} = \frac{2gh_m}{v^2}$.

6. Определить число Рейнольдса $Re = Vd/\nu$ и построить график зависимости $\xi = f(Re)$ в полулогарифмических координатах ξ и $lg(Re)$, по графику найти границы квадратичной зоны для данного местного сопротивления, в которой $\xi = const$.

7. Выбирать из справочника или рассчитать (для резкого расширения по формуле Борда) значение коэффициента ξ аналогичного местного сопротивления. Результаты вычислений записываются в таблице 7.

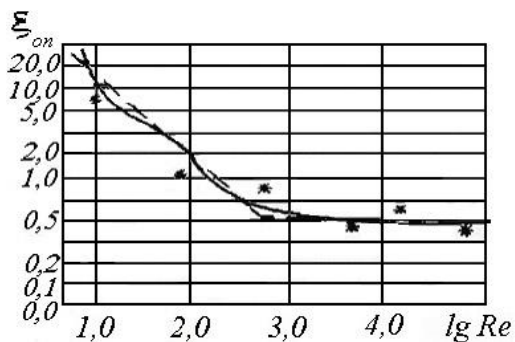


Рис. 24 Зависимость коэффициента местного сопротивления диафрагмы ξ от числа Рейнольдса Re

Контрольные вопросы

1. Что такое местное сопротивление?
2. Как определяются потери напора в местных сопротивлениях?
3. От чего зависит величина коэффициента местных потерь?
4. Почему опытный коэффициент отличается от табличного?
5. В чем состоит принцип наложения потерь?
6. Как влияет вязкость жидкости на коэффициент сопротивления?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учебник для вузов / Д. В. Штеренлихт. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : КолосС, 2004. – 655 с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : [учебник] / Т. М. Башта [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. Гейер В.Г. Гидравлика и гидропривод : учебник для вузов / В. Г. Гейер, В. С. Дулин, А. Н. Заря. – 3-е изд., перераб и доп. – Москва : Недра, 1991. – 331 с.
4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик ; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1992. – 672 с.
5. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / под ред. Б.Б. Некрасова. – Минск : Вышэйш. шк., 1985. – 382 с.
6. Руководство пользователя комплекса компьютерных лабораторных работ по дисциплине «Гидромеханика» / ТюмГНГУ. – Тюмень, 2004. – 11 с.

Учебное издание

ГИДРАВЛИКА

Лабораторный практикум

Составитель

Валентина Ивановна Худовец

В редакции составителя

Лицензия ЛР 020427 от 25.04.1997 г.

Подписано к печати 09.04.2019 г. Формат 60×90/16.

Уч.-изд.л. – 3,4. Усл.-п.л. – 6,4. Тираж 50 экз. Заказ 81.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии издательства
Дальневосточного государственного аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86