

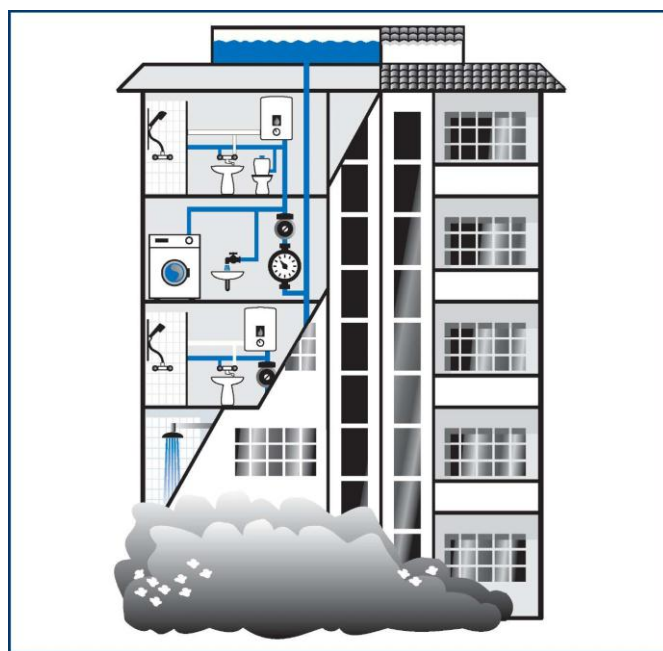
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГОУВПО «БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Кафедра сельскохозяйственных, мелиоративных и строительных машин

ГИДРАВЛИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ



Разработаны для бакалавров направлений:

110800-01 – Технические системы в агробизнесе;

110800-04 – Технический сервис в АПК;

280700 – Техносферная безопасность;

190100 – Наземные транспортно-технологические комплексы;

260800 – Технология продукции и организация общественного питания

Брянск 2013

УДК 532:631.3.033 (07)

ББК 30.123

С 72

Спиридонов В.К. *Методические указания к выполнению лабораторных работ по гидравлике для бакалавров направлений:* 110800-01 – Технические системы в агробизнесе; 110800-04 – Технический сервис в АПК; 280700 – Техносферная безопасность; 190100 – Наземные транспортно-технологические комплексы; 260800 – Технология продукции и организация общественного питания / В.К. Спиридонов, Л.А. Паршикова, А.М. Случевский – Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2013. - 64 с.

Ил.28, табл.10 , библиогр. назв. 4

Рецензент: доцент кафедры ТОЖПП, к.э.н. Исаев Х.Б.

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-технологического факультета Брянской государственной сельскохозяйственной академии, протокол №9 от 22.05. 2013г.

© ФГОУ ВПО Брянская ГСХА, 2013

© Спиридонов В.К., 2013

© Паршикова Л.А., 2013

© Случевский А.М., 2013

ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Общие требования безопасности

1.1 К работе в лаборатории допускаются лица, не имеющие отклонений в состоянии здоровья или временного его ухудшения (недомогания).

1.2 Пребывание студентов в лаборатории допускается только в присутствии инженера, заведующего лабораторией или преподавателя кафедры.

1.3 В лаборатории необходимо проявлять осторожность, соблюдать порядок и чистоту на рабочем месте.

1.4 Запрещается использовать и хранить в лаборатории легковоспламеняющиеся, ядовитые и взрывоопасные вещества.

1.5 В случае неисправности оборудования, инструмента и приспособлений, а также в случае травмирования работающего необходимо сообщить заведующему лабораторией, инженеру или преподавателю.

1.6 Соблюдение требований настоящей инструкции обязательно для всех лиц, работающих в лаборатории гидравлики.

2. Перед работой

2.1 Приступать к выполнению лабораторных работ только после инструктажа преподавателя на рабочем месте.

2.2 Проверить наличие необходимых приборов, инструментов, учебных пособий для данной работы.

2.3 Освободить рабочее место от ненужных предметов и материалов.

2.4 Изучить лабораторную работу: ее описание и методику выполнения.

2.5 При обнаружении неисправностей в состоянии приборов, установок, необходимо прекратить подготовку к работе и поставить в известность заведующего лабораторией, инженера или преподавателя.

3. Во время работы

3.1 Выполнять только ту работу, которая предусмотрена заданием или поручена преподавателем.

3.2 Не покидать рабочее место без разрешения преподавателя. Хождение по лаборатории категорически воспрещается.

3.3 Не допускать перелива воды в напорных и водосливных стендах.

3.4 При обнаружении трещин или нарушении целостности стеклянных приборов поставить в известность преподавателя, в случае разбивания стеклянных приборов, осторожно собрать стекло.

3.5 Не дотрагиваться до оголенных электрических проводов, в случае обнаружения таковых немедленно поставить в известность преподавателя.

3.6 Не облакачиваться, не прислоняться, не садиться на оборудование.

4. По окончании работы

4.1 Отключить силовое питание лаборатории.

4.2 Перекрыть все подводящие напорные трубопроводы.

4.3 Слить воду из емкостей и трубопроводов.

4.5 Привести в порядок рабочее место.

4.6. Лаборатория может быть оставлена только после приемки рабочего места и с разрешения преподавателя.

4.7 Уходя, выключить освещение лаборатории.

5. Действия при аварийных ситуациях и несчастных случаях

5.1 При возникновении аварийной ситуации (пожар, появление резких запахов) четко выполнять указания преподавателя и при необходимости эвакуироваться из помещения.

5.2 При обнаружении неисправностей в электрических установках, находящихся под напряжением, немедленно отключить источник электропитания и сообщить об этом преподавателю.

5.3 При возникновении пробоя напорного трубопровода немедленно остановить работу и сообщить о случившемся преподавателю.

5.4 При получении травмы или внезапного заболевания принять незамедлительные меры к оказанию первой медицинской помощи пострадавшему и сообщить преподавателю.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Законы равновесия и движения жидкостей, взаимодействующих с ограничивающими стенками или обтекаемыми телами, весьма сложны и, в большинстве случаев, их не удастся описать аналитически, исходя из основных законов механики. Поэтому в гидравлике широко применяется экспериментальный метод, как для исследования общего характера, так и для решения конкретных инженерных задач.

Настоящие методические указания включают в себя: краткие теоретические сведения по изучаемой теме; схему лабораторной установки; порядок проведения работы на установке; таблицу с исходными и опытными данными; формулы для обработки опытных данных; вопросы к защите лабораторной работы. Необходимые вычисления производятся здесь же, на свободном поле.

К каждой лабораторной работе студенты обязаны готовиться: проработать соответствующие разделы учебников; тщательно изучить методические указания; выполнить подготовительную работу по составлению отчета (сформулировать цель работы, уяснить последовательность выполнения работы, ознакомиться с формулами для обработки опытных данных).

В отчете особое внимание следует уделить формулировке выводов по выполняемой работе. В них должны быть отражены наиболее важные результаты, вытекающие из экспериментальных данных и содержаться ответы на вопросы, поставленные в разделе «Цель работы».

Экспериментальную часть работы студенты выполняют самостоятельно, с соблюдением требований по технике безопасности. Преподаватель контролирует проведение опыта, обработку материала и принимает выполненную работу.

Методические указания выдаются каждому студенту и хранятся у него до экзамена. Студенты, не выполнившие лабораторные работы, к экзамену не допускаются.

Библиографический список:

1. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 2005. – 640с.: ил.
2. Косой В.Д. Пособие для лабораторных и практических занятий по курсу «Гидравлика». Учебное пособие для вузов. – М. ДеЛи, 2007.
3. Артемьева Т.В., Лысенко Т.М., Румянцева А.Н., Стесин С.П. Гидравлика, гидромашины и гидропривод: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – 3-е изд., стер. – М: Издательский центр «Академия», 2007. – 336с.
4. Сабашвили Р.Г. Гидравлика, гидравлические машины и водоснабжение сельского хозяйства: Учебное пособие для вузов. – М.: Колос, 1997. – 479с.: ил.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Основные физические свойства жидкости

Цель работы: Изучить основные физические свойства жидкости и ознакомиться с приборами для их измерения

Краткие теоретические сведения

Жидкость – это физическое тело, обладающее двумя особыми свойствами:

1. весьма мало изменяет свой объём при изменении давления и температуры;
2. обладает текучестью, благодаря чему, не имеет собственной формы и принимает форму того сосуда, в котором она находится.

Основными физическими свойствами ньютоновских жидкостей, т.е. вязких жидкостей, отвечающих закону Ньютона о внутреннем трении, являются плотность, удельный вес, относительный вес, сжимаемость, температурное расширение, вязкость, поверхностное натяжение, текучесть.

Плотностью жидкости ρ называется отношение массы жидкости M к её объёму W :

$$\rho = \frac{M}{W} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right].$$

Удельным (объемным) весом жидкости γ называется отношение веса жидкости G к её объёму W :

$$\gamma = \frac{G}{W} \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^3} \right].$$

Плотность жидкости ρ и удельный вес γ связан между собой соотношением: $\gamma = \rho g$.

Относительным весом δ называется отношение удельного веса данной жидкости к удельному весу дистиллированной воды, взятой в том же объеме при температуре 4^0C :

$$\delta = \frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{в}}},$$

где $\gamma_{\text{ж}}$ – удельный вес жидкости; $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес дистиллированной воды.

Сжимаемость – свойство жидкости изменять свой объём при изменении давления. Сжимаемость характеризуется коэффициентом объёмного сжатия β_c , представляющим относительное изменение объема жидкости W при изменении давления p на единицу:

$$\beta_c = -\frac{1}{W} \frac{dW}{dp} \left[\frac{M^2}{H} \right].$$

Знак минус обусловлен тем, что положительному приращению давления p соответствует уменьшение объема W .

Величина, обратная коэффициенту объёмного сжатия называется **модулем упругости жидкости** $E_{жс}$:

$$E_{жс} = \frac{1}{\beta_c} \left[\frac{H}{M^2} = Pa \right].$$

Температурное расширение – свойство жидкости изменять объём при изменении температуры. Характеризуется коэффициентом температурного расширения β_t , представляющим относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на единицу (на $1^0 C$) при постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt} \left[\frac{1}{^0 C} \right].$$

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу слоёв. Характеризуется коэффициентом динамической вязкости μ :

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{d\theta}{dt}} \left[\frac{кг}{M \cdot c} = Pa \cdot c \right],$$

где τ - касательное напряжение; $\frac{d\theta}{dt}$ - скорость деформации сдвига.

В гидравлических расчётах кроме динамической вязкости широко используется **кинематическая вязкость** ν , равная отношению динамической вязкости μ к плотности жидкости ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{M^2}{c} \right].$$

Поверхностное натяжение - свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул. Поверхностное натяжение стремится сократить свободную поверхность жидкости и характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения, численно равным силе на единице длины контура свободной поверхности.

Поверхностное натяжение определяется видом жидкости, газа над ее свободной поверхностью, примесями и температурой. Кроме перечисленных свойств, жидкость обладает испарением, конденсацией, кипением, смачиванием, смешиваемостью.

Испарение - постепенный переход вещества из жидкого состояния в газообразную фазу (пар). При тепловом движении некоторые молекулы покидают жидкость через её поверхность и переходят в пар. Вместе с тем, часть молекул переходит обратно из пара в жидкость. Если из жидкости уходит больше молекул, чем приходит, то имеет место испарение.

Конденсация - обратный испарению процесс, переход вещества из газообразного состояния в жидкое. При этом в жидкость переходит из пара больше молекул, чем в пар из жидкости.

Испарение и конденсация - неравновесные процессы, они происходят до тех пор, пока не установится локальное равновесие (если установится), причём жидкость может полностью испариться, или же прийти в равновесие со своим паром, когда из жидкости выходит столько же молекул, сколько возвращается.

Кипение - процесс парообразования внутри жидкости. При достаточно высокой температуре давление пара становится выше давления внутри жидкости, и там начинают образовываться пузырьки пара, которые (в условиях земного притяжения) всплывают наверх.

Смачивание - поверхностное явление, возникающее при контакте жидкости с твёрдой поверхностью в присутствии пара, то есть на границах раздела трёх фаз. Смачивание характеризует «прилипание» жидкости к поверхности и растекание по ней (или, наоборот, отталкивание и нерастекание).

Смешиваемость - способность жидкостей растворяться друг в друге. Пример смешиваемых жидкостей: вода и этиловый спирт, пример несмешиваемых: вода и жидкое масло. При нахождении в сосуде двух смешиваемых жидкостей молекулы в результате теплового движения начинают постепенно проходить через поверхность раздела, и таким образом жидкости постепенно смешиваются. Это явление называется диффузией (происходит также и в веществах, находящихся в других агрегатных состояниях).

Приборы для измерения плотности жидкости

Измерение плотности является одним из методов, позволяющих непосредственно в процессе производства определять такие свойства жидкостей, как концентрация кислот и щелочей, состав пульпы и т. п.

Для измерения плотности жидкостей чаще всего применяют буйковые, весовые, гидростатические и радиоизотопные плотномеры.

Принцип действия **буйковых плотномеров** состоит в применении неподвижного буйка, передающего выталкивающее его усилие на рычаг промежуточного преобразователя. Бук всегда полностью погружен в измеряемую жидкость и поэтому ее объем, вытесненный буйком, постоянный. Поэтому сила, в соответствии с законом Архимеда, будет изменяться только в зависимости от плотности жидкости.

В **весовых** плотномерах непрерывно взвешивается постоянный объем жидкости. В таких плотномерах жидкость протекает по петлеобразному участку трубы, соединенному с основным трубопроводом гибкими соединениями (сильфонами). Вес трубы с жидкостью пропорционален плотности протекающей по петле жидкости. Измерение веса петли производится преобразователем (электрическим или пневматическим), к рычагу которого подвешена труба.

Действие **гидростатического плотномера** основано на том, что давление, создаваемое столбом жидкости постоянной высоты, пропорционально ее плотности. Для измерения плотности нет необходимости поддерживать постоянный уровень измеряемой жидкости в емкости. Достаточно применить в качестве измерительного устройства дифманометр. При таком включении он измеряет разность давлений, создаваемых дву-

мя столбами жидкости. Ясно, что при любом уровне в емкости разность столбов жидкости постоянна и перепад давлений будет зависеть только от плотности жидкости.

Радиоизотопные плотномеры, в отличие от рассмотренных выше, позволяют измерять плотность неконтактным способом. Их действие основано на ослаблении радиоактивного излучения с повышением плотности измеряемой жидкости.

В состав радиоизотопного плотномера входят источник и приемник γ -излучения, выходной сигнал которого подается на автоматический потенциометр. Интенсивность излучения, воспринимаемая приемником, зависит от плотности, протекающей по трубопроводу жидкости: чем больше плотность, тем сильнее поглощение у излучения и тем меньше сигнал на входе приемника. На величину этого сигнала будут влиять также толщина стенок трубы, состав жидкости и другие факторы, уменьшающие излучение источника. Так как влияние этих факторов стабильно, оно учитывается путем введения в показания поправки, полученной при градуировке прибора.

Примеры плотномеров

К **ареометрам** постоянной массы относятся денсиметры (рисунок 1а), шкалы которых градуируются в единицах плотности, и приборы для определения концентраций растворов (шкалы градуируются в % по объему или по массе), имеющие спец. названия: лактомеры - измеряют жирность молока, спиртомеры - содержание спирта в воде, сахаромеры - содержание сахара в сиропах и т.д.

При определении плотности ареометрами постоянного объема (рисунок 1б) путем изменения массы поплавок достигают его погружения до соответствующей метки. Плотность находят по массе гирь (размещают на тарелке) и ареометра и по объему вытесненной им жидкости. Такие приборы могут быть использованы также для измерения плотности твердых тел.



- 1 – шкала плотности; 2 – балласт (дробь); 3 – связующая масса;
4 – встроенный термометр; 5 – тарелка для гирь; 6 – метка

Рисунок 1 - Ареометры:

а – постоянной массы (денсиметр); б – постоянного объема

Пикнометры. Плотность находят по отношению массы жидкости к ее объему. Объем измеряют по шкале или меткам на сосуде (рисунок 2), массу - взвешиванием на аналитических весах. Пикнометры специальной формы (шаровидные и др.) применяют также для определения плотности газов.



1 – колба для жидкости;
2 – проволочная петля для подвешивания прибора к чашкам весов; 3 - метка

Рисунок 2 – Пикнометры: а – U-образный капиллярный; б – Оствальда

Плотность твердых тел (порошков) измеряют, погружая их в сосуды, которые называют **волюмометрами** (рисунок 3), заполняя жидкостью, в которой исследуемое вещество не растворяется.

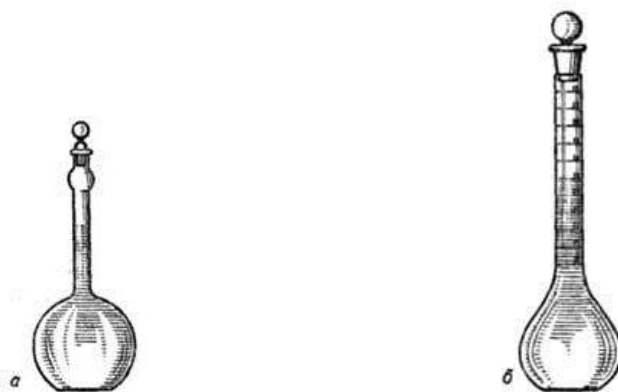
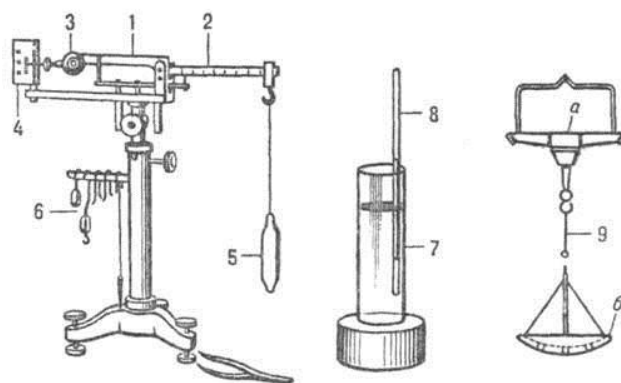


Рисунок 3 – Волюмометры: а – с притертой пробкой; б – с градуированным горлом

Приборы для гидростатического взвешивания. Данный метод определения плотности жидкостей и твердых тел также основан на законе Архимеда. Плотность жидкости измеряют, взвешивая в ней какое-либо тело (обычно стеклянный поплавок), масса и объем которого известны. Плотность твердого тела определяют его двукратным взвешиванием - сначала в воздухе, а затем в жидкости с известной плотностью (как правило, в дистиллированной воде); при первом взвешивании находят массу тела, по разности результатов обоих взвешиваний - его объем. В зависимости от требуемой точности гидростатическое взвешивание проводят на технических, аналитических или образцовых весах. При массовых измерениях широко используют менее точные, но более быстродействующие специальные гидростатические весы, например, весы Мора, Вестфалья либо их комбинацию (рисунок 4).



1 – неравноплечное коромысло; 2,4 – шкалы, соответственно в виде поперечных надрезов для гирь и указателя равновесия; 3- неподвижный противовес; 5 – стеклянный поплавок; 6 – гири-рейтеры; 7 – сосуд с жидкостью; 8 – термометр; 9 – двойная чашка для помещения твердых тел (верхняя - а – сплошная, нижняя – б – с отверстиями, ее погружают в воду)

Рисунок 4 – Гидростатические весы Мора-Вестфалья

Плотность вязких жидкостей лучше всего измерять ареометрами или с помощью гидростатических весов, маловязких - пикнометрами.

Наряду с плотномерами традиционных типов в лабораторной практике все чаще применяют приборы, которые до последнего времени были распространены только в промышленности.

Технологические плотномеры. Эти приборы представляют собой автоматические плотномеры обычно для непрерывного определения и регулирования плотности веществ в процессе их производства или переработки. Такие плотномеры размещают непосредственно на "потоках", т.е. в контрольных точках на технологических линиях, а также на аппаратах промышленных установок.

Приборы для измерения вязкости жидкости

Вискозиметр - прибор для определения динамической или кинематической вязкости вещества. В системе единиц СИ динамическая вязкость измеряется в паскаль-секундах (Па·с), кинематическая - в квадратных метрах на секунду (m^2/c).

Вискозиметры бывают: капиллярными, ротационными, с падающим шариком и других типов.

Капиллярные вискозиметры Принцип действия капиллярных вискозиметров основан на подсчёте времени протекания заданного объёма жидкости через узкое отверстие или трубку при заданной разнице давлений. Чаще всего, жидкость из резервуара вытекает под действием собственного веса, в таком случае вязкость пропорциональна разнице давлений между жидкостью, вытекающей из капилляра и жидкостью на том же уровне, вытекающей из очень толстой трубки. Если течение жидкости в приборе осуществляется только под действием силы тяжести (например, в вискозиметре Уббелодде), то при работе капиллярного вискозиметра определяется кинематическая (не динамическая) вязкость. С помощью капиллярного вискозиметра измеряются вязкости от 10 мкПа·с (газы) до 10 кПа·с.

Ротационные вискозиметры. Два тела вращения, одинаковых или разных, совмещаются по осям так, что одно из них прикасается изнутри к другому (примером может послужить сфера, вписанная в конус). Пространство между телами заполняют исследуемым веществом, и к одному из тел подаётся крутящий момент, тело начинает вращаться с угловой скоростью, зависящей от вязкости вещества (у вискозиметров, как правило, стабилизируется скорость вращения и измеряется крутящий момент). Диапазон работы стандартных вискозиметров простирается от 1 мПа·с до сотен тысяч Па·с. Такой широкий диапазон измерений достижим за счёт изменения скорости вращения шпинделя от 0,01 оборота в минуту до 100, а также за счёт использования шпинделей разных размеров при разных диапазонах вязкости.

Вискозиметр с движущимся шариком основан на законе Стокса. Вязкость определяется по времени прохождения шариком некоего расстояния, чаще всего под воздействием его собственного веса. Наиболее известен вискозиметр Гепплера.

Вискозиметр с вибрирующим зондом основан на изменении резонансной частоты колебаний в жидкости различной вязкости. Так как частота будет зависеть и от плотности измеряемой жидкости, некоторые модели позволяют определять эту плотность независимо от вязкости, тогда как другие используют заданное известное значение плотности.

Вискозиметр пузырькового типа основан на определении параметров движения пузырька газа свободно всплывающего в вязкой среде.

Примеры современных вискозиметров

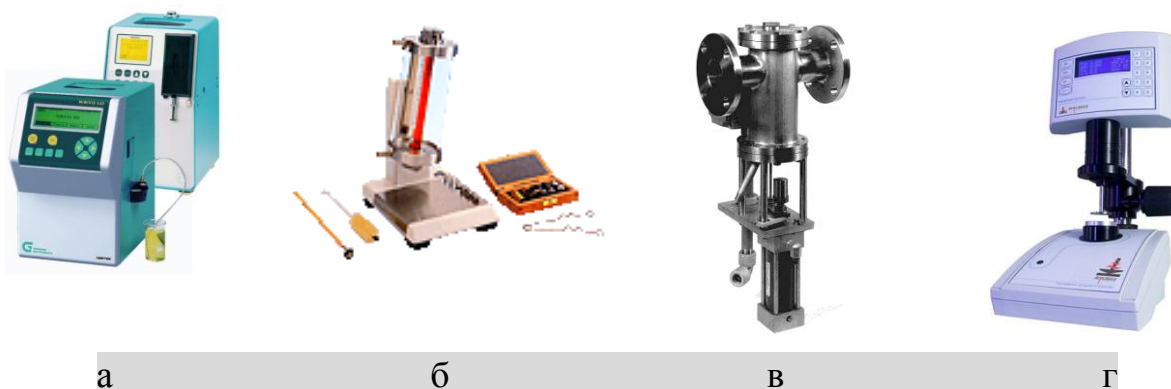


Рисунок 5 – Вискозиметры

а – Вискозиметр серии MINIVIS – это автоматический, контролирующий температуру микро-вискозиметр с падающим шариком, используемый для измерения вязкости для всех видов ньютоновских жидкостей. Использование датчиков отражения позволяет охватить широкий спектр применения: отработанные масла, тяжелые нефти, черные чернила, кровь. Позволяют проводить измерения с высокой точностью и повторяемостью. Малый объем необходимой пробы и удобство в обращении устраняет обычные проблемы очистки, возникающие у других вискозиметров.

б – Вискозиметр Гепплера позволяет осуществлять точное измерение динамической вязкости прозрачных жидкостей и газов. Различные тестовые шары вискозиметра

используются для образцов с низкой вязкостью в химической и фармацевтической промышленности, пищевой или нефтяной промышленности.

в – Поточный вискозиметр М50, рабочий диапазон вязкости – 0,1-2,000 Па с. Позволяет измерять вязкость при низком давлении.

г – Ротационный вискозиметр MERLIN является прочным, высокопроизводительным устройством, способным к надежному тестированию, и обладает компактным размером. Вискозиметр предназначен для выполнения реологических исследований различных уровней сложности. Идеально подходит для исследования смесей и характеристики потоков жидкости.

Измерение поверхностного натяжения жидкости

Поверхностное натяжение - это удельная свободная энергия поверхностного слоя на границе раздела двух фаз, измеряемая работой, которую необходимо затратить на образование 1 см^2 поверхности раздела при постоянной температуре. Поверхностное натяжение измеряется в $\text{эрг}\cdot\text{см}^{-2}$. Поверхностное натяжение может быть непосредственно измерено только в случае поверхности раздела жидкость - газ (насыщенный пар) или жидкость - жидкость. Поверхностное натяжение, измеренное в условиях, когда поверхностный слой еще не достиг равновесного состояния, называют динамическим, а измеренное в равновесных условиях - статическим поверхностным натяжением. Время для достижения равновесного состояния поверхностного слоя чистых жидкостей и растворов низкомолекулярных веществ не превышает обычно нескольких тысячных долей секунды. Для коллоидных растворов и растворов высокомолекулярных веществ это время значительно больше и измеряется иногда многими часами. В биохимических, физиологических и фармакологических исследованиях наиболее распространены следующие методы измерения поверхностного натяжения:

1. Сталагмометрический метод состоит в определении числа капель, образующихся при вытекании данного объема жидкости из капиллярного отверстия специальной пипетки — сталагмометра (рисунок 6).



1— верхняя метка, 2— нижняя метка

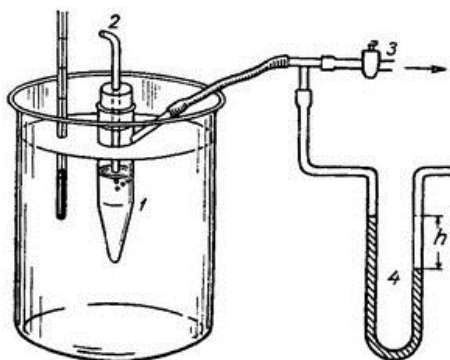
Рисунок 6 - Сталагмометр Траубе

Определив при помощи одного и того же сталагмометра число капель (n) исследуемой жидкости и число капель (n_0) стандартной жидкости (обычно воды) с известным поверхностным натяжением σ_0 , вычисляют поверхностное натяжения исследуемой жидкости а по формуле:

$$\sigma = \frac{n_0 \sigma_0 \gamma}{n \gamma_0}$$

где γ и γ_0 — удельные веса исследуемой и стандартной жидкости соответственно.

2. Метод продавливания пузырьков воздуха (рисунок 7) (предложен П. А. Ребиндером) основан на измерении давления p , необходимого для продавливания пузырька воздуха через капилляр, находящийся в соприкосновении с поверхностью исследуемой жидкости, и давления p_0 , необходимого для продавливания пузырька воздуха через тот же самый капилляр, находящийся в соприкосновении с поверхностью стандартной жидкости, поверхностное натяжение σ_0 которой известно. Поверхностное натяжение исследуемой жидкости σ находят по уравнению: $\sigma = \frac{\sigma_0 p}{p_0}$



1 – сосудик для жидкости; 2 – капилляр; 3 – кран к респиратору; 4 – манометр

Рисунок 7 - Прибор Ребиндера

Метод Ребиндера более точен, чем сталагмометрический. Эти методы пригодны не только для измерения поверхностного натяжения на границе раздела жидкость — газ (воздух), но и на границе раздела двух жидких фаз. В последнем случае капли одной жидкости продавливают через капилляр в приборе Ребиндера (рисунок 6) или заставляют вытекать из сталагмометра в другую жидкость.

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Перечислите основные физико-механические свойства жидкостей
2. Что такое плотность жидкости? Назовите единицу измерения плотности
3. Какая существует связь между плотностью и удельным весом жидкости?
4. Что такое вязкость жидкости? Какая существует связь между коэффициентом динамической и кинематической вязкости?
5. Что такое сжимаемость жидкости? Каким коэффициентом она характеризуется?
6. Что такое температурное расширение? Каким коэффициентом оно характеризуется?
7. Какими приборами можно измерить плотность жидкости?
8. Какими приборами можно измерить вязкость жидкости?
9. Что такое поверхностное натяжение? Какими приборами можно измерить поверхностное натяжение жидкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Приборы и методы измерения гидростатического давления

Цель работы: Изучить принцип действия приборов и методы измерения гидростатического давления.

Краткие теоретические сведения

Из-за текучести жидкости на нее действуют силы, распределенные по массе. К ним относятся силы тяжести, инерции и др. На граничной поверхности на жидкость действуют внешние поверхностные силы. Под их действием жидкость находится в напряженном состоянии, которое в каждой точке характеризуется давлением.

Давлением в жидкости называется напряжение сжатия p , которое определяется в каждой точке: $p = p_0 + \rho gh$.

где p_0 - давление на свободной поверхности жидкости;

ρ - плотность жидкости;

h - глубина погружения рассматриваемой точки под свободную поверхность.

Единица измерения давления в системе СИ – паскаль (Па):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Для перевода из одной системы измерения давления в другую используют соотношение: $1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10 \text{ м вод. ст.} = 735,5 \text{ мм рт. ст.} = 98100 \text{ Па} \approx 0,1 \text{ МПа}$.

Абсолютный нуль давления соответствует отсутствию сжимающих напряжений в жидкости. Давление, отсчитанное от абсолютного нуля, называется абсолютным давлением, или просто давлением, и обозначается p . Абсолютное давление может быть больше или меньше атмосферного давления $p_{\text{ат}}$. Избыток абсолютного давления над атмосферным называется манометрическим, или избыточным давлением и определяется:

$$p_{\text{м}} = p - p_{\text{ат}}$$

Недостаток абсолютного давления до атмосферного называется вакуумметрическим давлением или разрежением и обозначается $p_{\text{в}}$:

$$p_{\text{в}} = p_{\text{ат}} - p;$$

Максимально возможный в жидкости вакуум ограничен величиной, соответствующей при данной температуре давлению насыщенного пара жидкости:

$$p_{\text{в max}} = p_{\text{ат}} - p_{\text{н.п.}}$$

где $p_{\text{н.п.}}$ – давление насыщенного пара.

Для измерения давления применяются разнообразные приборы. По характеру измеряемой величины приборы разделяются на следующие группы:

- 1) для измерения атмосферного давления – **барометры**;
- 2) для измерения разности абсолютного и атмосферного давлений – **манометры и вакуумметры**;
- 3) для измерения абсолютного давления – **манометры абсолютного давления**;
- 4) для измерения разности давлений – **дифференциальные манометры**;
- 5) для измерения малого избыточного давления и вакуума.

По принципу действия различают приборы **жидкостные, пружинные, поршневые, электрические и др.** В работе рассматриваются только жидкостные и пружинные приборы.

К **жидкостным** относят приборы, основанные на гидростатическом принципе действия, который заключается в том, что измеряемое давление уравнивается давлением, создаваемым весом столба жидкости.

Действие **пружинных** манометров основано на применении закона Гука. Сила давления деформирует упругий элемент прибора – пружину, которая может представлять собой полую трубку, мембрану и т.п.

Деформация упругого элемента, вызванная давлением, по закону Гука пропорциональна давлению.

Жидкостные приборы

Ртутный барометр (рисунок 8). Прибор состоит из открытой в атмосферу чашки 1, заполненной ртутью, и стеклянной трубки 2, верхний конец которой запаян, а нижний – опущен под уровень ртути.

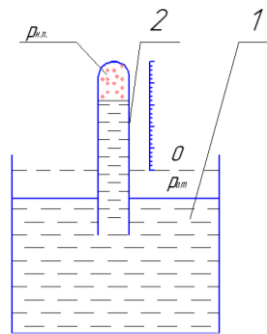


Рисунок 8 – Ртутный барометр

Воздух из трубки предварительно удален, поэтому трубка заполняется насыщенным паром ртути, давлением $p_{н.п.}$. Атмосферное давление $p_{ат}$, действуя на поверхность ртути в чашке, поднимает ртуть в трубке на высоту h , при которой сумма давлений паров и столба ртути уравнивается атмосферным давлением:

$$p_{ат} = p_{н.п.} + \rho_{рт}gh,$$

при $t = 0^{\circ}\text{C}$, $p_{н.п.} \approx 0$, $p_{ат} = \rho_{рт}gh$.

Пьезометр (рисунок 9). Применяется для измерения избыточного давления и представляет собой прозрачную трубку, один конец которой соединяется с областью, где измеряется давление, а другой – открыт в атмосферу.

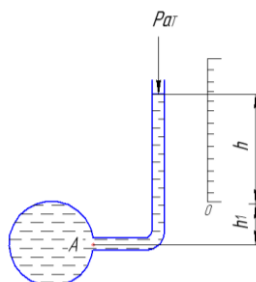


Рисунок 9 - Пьезометр

Избыточное давление в произвольно выбранной точке A жидкости определяется по формуле:

$$p_A = \rho g(h + h_1),$$

где h – показания пьезометра,

h_1 – глубина точки A под уровнем нулевого штриха шкалы прибора (расстояние от точки замера до нуля шкалы прибора).

Обратный пьезометр (рисунок 10). Применяется для измерения давления меньше атмосферного, т.е. вакуума. Он измеряет разность давлений атмосферного и абсолютного, причем $p < p_{ат}$: $p = p_{ат} - \rho g h_{вак}$

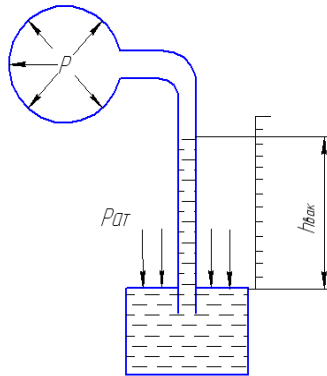


Рисунок 10 – Обратный пьезометр

U-образный манометр (рисунок 11). Представляет собой U-образную стеклянную трубку, заполненную рабочей жидкостью.

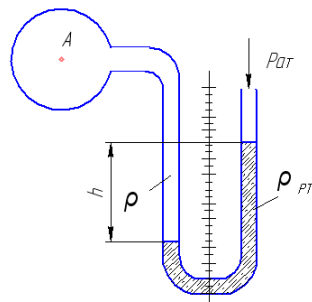


Рисунок 11 – U-образный манометр

Обычно в качестве рабочих жидкостей используются следующие:

- вода $\rho_в = 1000 \text{ кг/м}^3$;
- спирт $\rho_с = 790 \text{ кг/м}^3$;
- ртуть $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$;
- бромистый этилен $\rho_{бэ} = 2180 \text{ кг/м}^3$ и др.

Уравнение равновесия запишется следующим образом:

$$p + \rho g h = p_{ат} + \rho_{рт} g h;$$

$$p - p_{ат} = g h (\rho_{рт} - \rho) = p_m.$$

Дифференциальный манометр (рисунок 12). Применяется для измерения разности давлений.

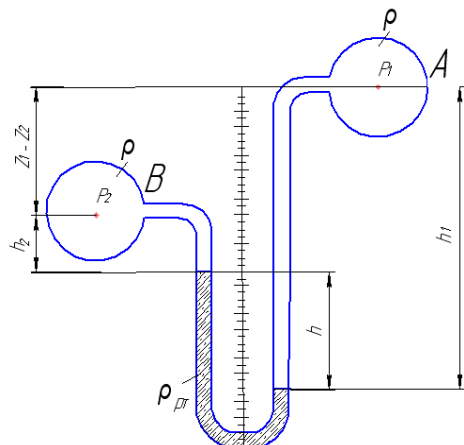


Рисунок 12 – Дифференциальный манометр

Уравнение равновесия записывается таким образом:

$$p_2 + \rho g h_2 + \rho_{рт} g h = p_1 + \rho g h_1;$$

$$h_1 = h + h_2 + (z_1 - z_2).$$

При $z_1 = z_2$:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = g h (\rho_{рт} - \rho),$$

где p_1 – давление жидкости в сосуде A ;

p_2 – давление жидкости в сосуде B ;

h_1 – расстояние от уровня ртути в трубке дифференциального манометра до точки, в которой измеряется давление в сосуде A ; h_2 – расстояние от уровня ртути в трубке дифференциального манометра до точки, в которой измеряется давление в сосуде B .

Микроманометр (рисунок 13). Применяется для измерения незначительных по величине давлений (25 ... 150 мм вод. ст.).

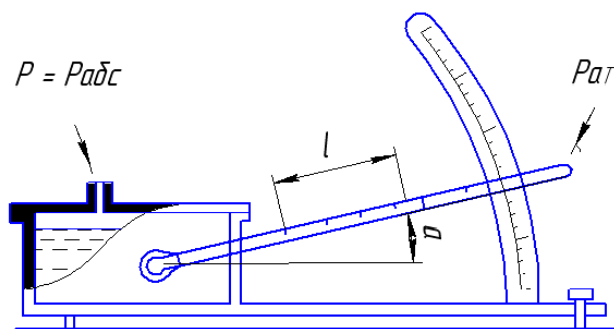


Рисунок 13 - Микроманометр

Избыточное давление на поверхности жидкости в чашке определяется:

$$p_m = \rho g l \sin \alpha,$$

где ρ – плотность рабочей жидкости (спирта);

l – показание прибора;

α – угол наклона трубки к горизонту.

Масштабом микроманометра называют величину $K = \sin \alpha$.

Основные преимущества жидкостных приборов – простота устройства и высокая точность измерений. К недостаткам жидкостных приборов относится узость диапазона измеряемых давлений. В тех случаях, когда необходимо измерять большие давления, применяются механические приборы.

Пружинные приборы

Пружинный манометр (рисунок 14). Основная деталь прибора – изогнутая латунная трубка (трубка Бурдона), имеющая в сечении эллиптическую форму. Один конец трубки запаян и через передаточный механизм соединен со стрелкой прибора, а другой – с областью, где измеряется давление.

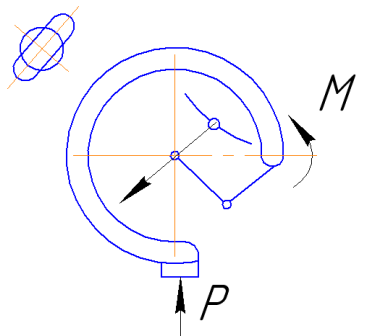
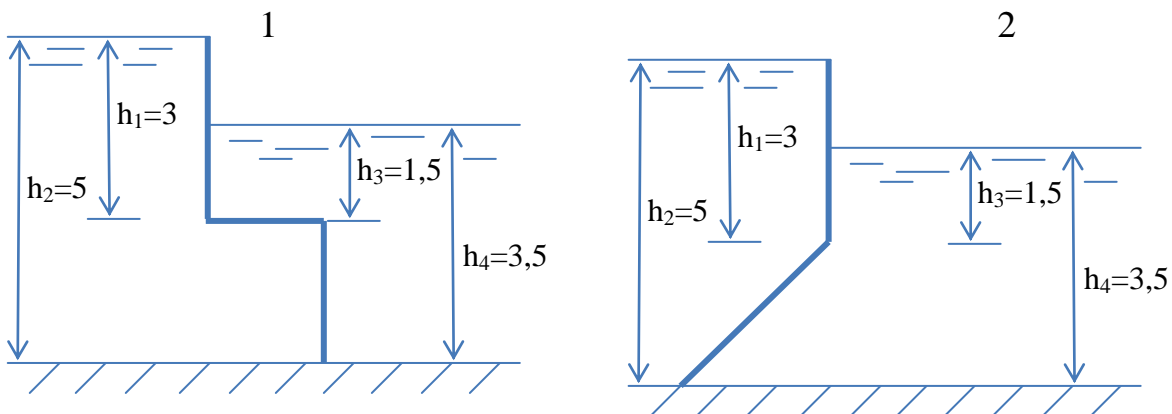


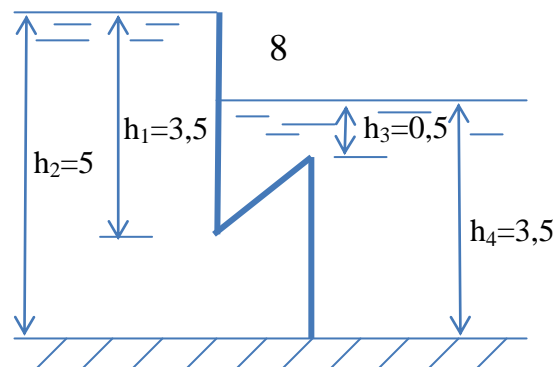
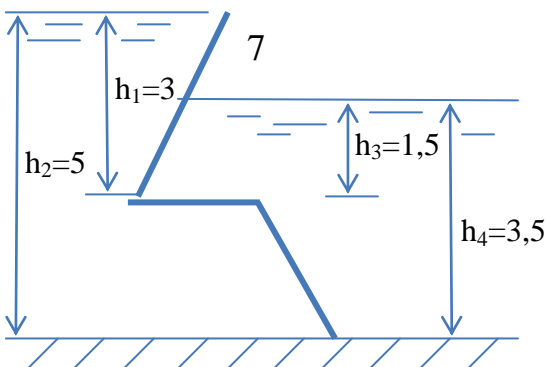
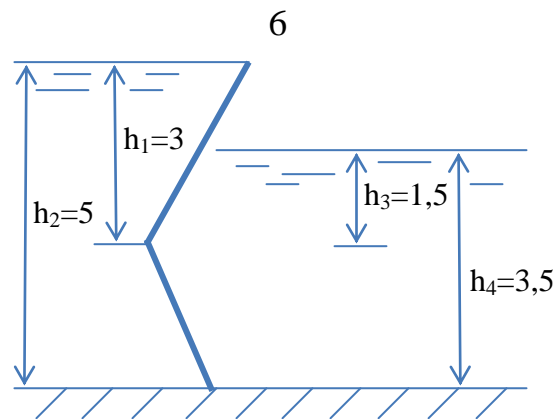
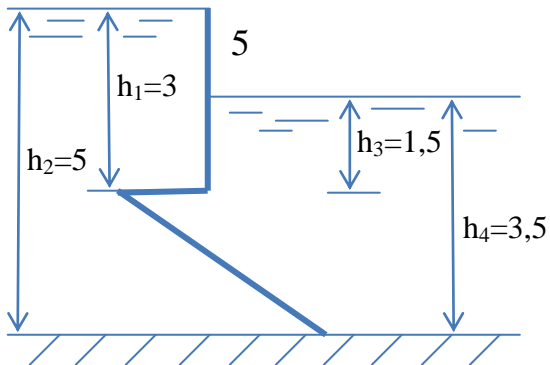
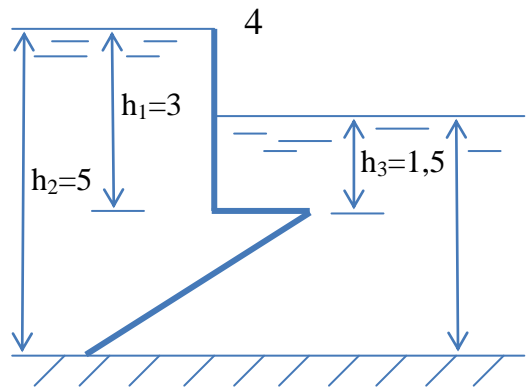
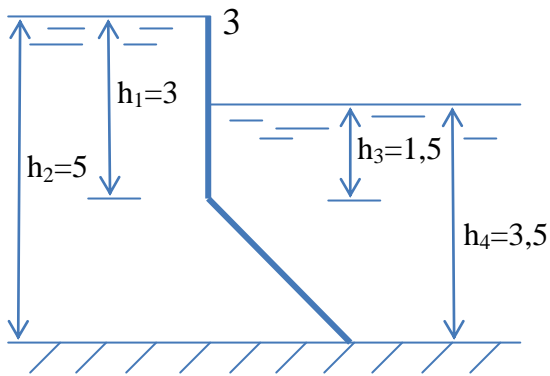
Рисунок 14 – Пружинный манометр

Под действием давления сечение трубки деформируется: большая часть эллипса уменьшается, меньшая – увеличивается и благодаря возникающим напряжениям появляется момент M , разгибающий трубку. При этом стрелка прибора, связанная со свободным концом трубки через передаточный механизм, поворачивается на некоторый угол, пропорциональный измеряемому давлению.

Задания для самостоятельной работы

Построить эпюры манометрического давления воды на плоские поверхности в соответствии с вариантом.





Вопросы к защите лабораторной работы

1. Что называется давлением? Дать определение абсолютного, манометрического и вакуумметрического давлений.
2. Назвать единицы измерения давления и соотношения между ними.
3. Объяснить принцип работы и устройство приборов, измеряющих давление.
4. Перечислить свойства гидростатического давления.
5. Сформулировать закон Паскаля.
6. Каково устройство и принцип действия жидкостных и механических приборов
7. Укажите достоинства и недостатки приборов для измерения гидростатического давления.
8. Назовите существующие виды давления, как они определяются?
9. Какой из приборов позволяет отсчитывать избыточное давление с большей точностью и почему?
10. Назовите наибольшую величину вакуума.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Определение силы гидростатического давления на плоскую поверхность

Цель работы: Вычислить силу гидростатического давления воды на плоский прямоугольный вертикальный затвор опытным и теоретическим путем. Определить положение центра давления

Краткие теоретические сведения

Сила давления покоящейся жидкости на плоскую наклонную стенку равна по величине произведению смоченной площади этой стенки на давление, испытываемое ее центром тяжести, и направлена по внутренней нормали к площадке действия. При $P_0 = P_{atm}$ сила избыточного давления равна:

$$P = \rho g h_{cm} \omega,$$

где; ρ - плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, h_{cm} - глубина погружения центра тяжести плоской стенки под свободную поверхность; ω - смоченная площадь стенки.

Линия действия силы P пересекает плоскую стенку в точке D, которая называется **центром давления**. Центр давления всегда расположен на оси симметрии плоской стенки ниже центра тяжести (рисунок 15).

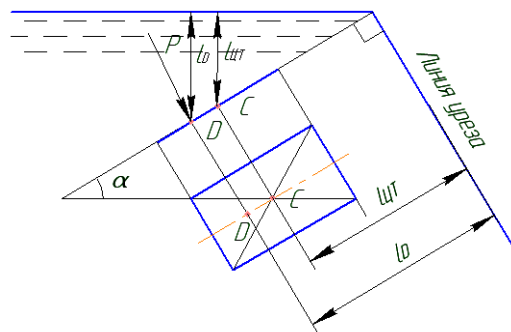


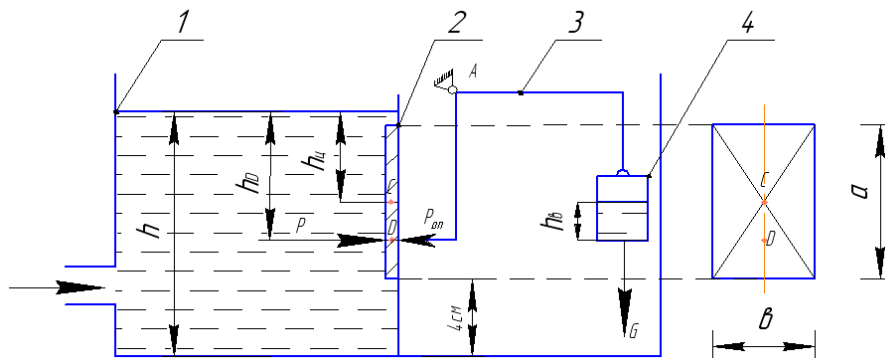
Рисунок 15- Схема к определению силы гидростатического давления на плоскую стенку, расположенную под углом α к линии горизонта

Для определения положения центра давления достаточно найти расстояние от линии уреза жидкости (линии пересечения свободной поверхности с плоскостью стенки) до точки D, т.е. координату l_D :

$$l_D = l_{cm} + \frac{I_0}{l_{cm} \omega},$$

где l_{cm} - расстояние от линии уреза до центра тяжести стенки, измеряемое вдоль наклонной плоскости;

I_0 - момент инерции смоченной площади относительно оси, проходящей параллельно линии уреза жидкости через центр тяжести этой площади.



1 Резервуар, 2. Затвор, 3. Рычаг, 4. Груз
Рисунок 16 – Схема лабораторной установки

Порядок проведения работы

Наполнить резервуар 1 водой до уровня, обеспечивающего полное прижатие затвора 2 к гнезду (рисунок 16). Измерить полученную глубину наполнения h . На рычаг 3 подвесить груз 4. В качестве груза использовать призматический стакан. Постепенно подливая в стакан воду, увеличивать вес груза $G_{сп}$ до тех пор, пока уравнивающая сила $P_{он}$ и сила гидростатического давления P не сравняются, в результате чего затвор приоткроется. Прекратить наполнять стакан водой, фиксировать груз, измерить уровень воды в стакане $h_г$. Повторить опыт несколько раз при различных значениях h . Результаты измерений внести в таблицу 1.

Таблица 1 – Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Един. изм.	Номер опыта		
			1	2	3
1	Глубина наполнения резервуара, h	м			
2	Высота воды в стакане, $h_г$	м			
3	Глубина погружения центра тяжести затвора под свободную поверхность, $h_{цт}$	м			
4	Вес воды в стакане, $G_г$	Н			
5	Опытное значение силы давления воды на плоский затвор, $P_{он} = G_{сп}$	Н			
6	Теоретическое значение силы давления воды на плоский затвор, P	Н			
7	Относительная погрешность в определении опытного значения силы давления воды на плоский затвор, $\delta_{P_{оп}}$	%			
8	Координата центра тяжести вдоль плоского затвора, $l_{цт}$	см			
9	Координата центра давления вдоль плоского затвора, l_D	см			

Обработка опытных данных

Затвор плоский, прямоугольный со сторонами
 $a = 10\text{см} = 0,1\text{м}; b = 5,5\text{см} = 0,055\text{м}$.

$\omega = a \times b, \text{м}^2$ – смоченная площадь затвора.

Определить опытное значение силы гидростатического давления на плоский вертикальный затвор, исходя из условия равенства моментов сил $P_{он}$ и $G_{зп}$ относительно точки А. Так как плечи указанных сил одинаковы, то выполняется равенство:

$$P_{он} = G_{зп} = G_{ст} + G_{в}, H$$

где: $G_{ст} = 2,6H$ - вес стакана;

$G_{в} = \rho g W, H$ - вес воды в стакане;

$W = S h_{в}, \text{м}^3$ - объем воды в стакане;

$S = 0,05 \times 0,05 = 0,0025 \text{м}^2$ - площадь дна стакана;

$h_{в}, \text{м}$ - высота воды в стакане.

Определить теоретическое значение силы гидростатического давления на затвор по формуле:

$$P = \rho g h_{ум} \omega, H$$

где $\rho = 1000 \text{кг} / \text{м}^3$ - плотность воды;

$g = 9,81 \text{м} / \text{с}^2$ – ускорение свободного падения;

$h_{ум} = h - (0,04 + a / 2), \text{м}$ - глубина погружения центра тяжести затвора под свободную поверхность воды;

$\omega = a \times b, \text{м}^2$ – смоченная площадь затвора.

Определить относительную погрешность опытного значения силы гидростатического давления на плоский затвор:

$$\delta_{P_{он}} = \frac{|P_{он} - P|}{P} 100\%$$

Найти координату центра давления ℓ_D по формуле:

$$\ell_D = h_D = \ell_{ум} + \frac{I_0}{\ell_{ум} \omega}, \text{см}$$

где $\ell_{ум} = h_{ум}, \text{см}$ – расстояние от линии уреза до центра тяжести затвора;

$I_0 = \frac{ba^3}{12}, \text{см}^4$ – момент инерции плоского прямоугольного затвора относительно оси,

проходящей параллельно линии уреза воды через центр тяжести затвора.

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 1.

Заключение

Сопоставить опытное и теоретическое значения силы гидростатического давления воды на плоский затвор. Объяснить имеющиеся расхождения

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Как определяется сила гидростатического давления на плоскую поверхность?
2. Что такое центр давления?
3. Как определить положение центра давления?
4. Как строится эпюра давления на плоскую поверхность?
5. Как по эпюре давления на плоскую прямоугольную поверхность определить силу гидростатического давления?
6. Сформулируйте закон Архимеда.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Определение силы гидростатического давления на цилиндрическую поверхность

Цель работы: Вычислить силу гидростатического давления воды на сегментный затвор опытным и теоретическим путем.

Краткие теоретические сведения

Сила давления покоящейся жидкости на цилиндрические поверхности, образующая которых параллельна оси ОУ, определяется по формуле:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2},$$

где: P_x и P_z горизонтальная и вертикальная составляющие силы P , параллельные координатным осям.

Горизонтальная составляющая представляет собой горизонтальную проекцию силы давления жидкости на цилиндрическую поверхность и определяется по формуле:

$$P_x = \rho g h_{cm}' \omega_x,$$

где: ρ - плотность воды;

g – ускорение свободного падения;

ω_x - площадь проекции смоченной криволинейной поверхности на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси ОХ;

h_{cm}' - глубина погружения центра тяжести этой проекции под свободную поверхность.

Вертикальная составляющая представляет собой вес жидкости в объеме тела давления и определяется по формуле:

$$P_z = \rho g W_D,$$

где W_D - **объем тела давления** (объем, ограниченный криволинейной поверхностью, ее проекцией на свободную поверхность и вертикальными проектирующими плоскостями).

Результирующая сила P гидростатического давления действует по нормали к цилиндрической поверхности, проходит по радиусу через центр кривизны под углом α к линии горизонта.

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{P_z}{P_x}$$

Функции α равны:

$$\cos \alpha = \frac{P_x}{P},$$

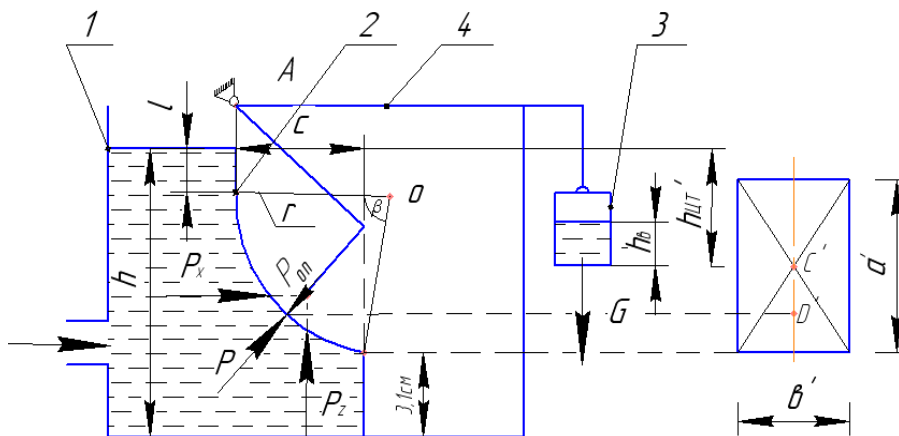
$$\sin \alpha = \frac{P_z}{P}$$

Координаты центра давления можно вычислить по формулам:

$$x = r \cos \alpha$$

$$z = r \sin \alpha,$$

где r - радиус кривизны.



1. Резервуар; 2. Сегментный затвор; 3. Груз; 4. Рычаг

Рисунок 17– Схема лабораторной установки

Порядок проведения работы

Наполнить резервуар 1 водой до уровня, обеспечивающего полное прижатие затвора 2 к гнезду (рисунок 17). Измерить полученную глубину наполнения h . На рычаг 4 подвесить груз 3. В качестве груза использовать призматический стакан. Постепенно подливать в стакан воду, увеличивая вес груза G_{sp} до тех пор, пока уравновешивающая сила P_{on} и сила гидростатического давления P не сравняются, в результате чего затвор приоткроется. Прекратить наполнять стакан водой, фиксировать груз, измерить уровень воды в стакане h_e . Повторить опыт несколько раз при различных значениях h . Результаты измерений внести в таблицу 2.

Таблица 2 - Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Един. изм.	Номер опыта		
			1	2	3
1	Глубина наполнения резервуара, h	м			
2	Высота воды в стакане, h_6	м			
3	Вес воды в стакане, G_6	Н			
4	Вес груза, G_{cp}	Н			
5	Опытное значение силы давления воды на сегментный затвор, $P_{on} = 2G_{cp}$	Н			
6	Глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции затвора под свободную поверхность, $h_{цт}'$	м			
7	Горизонтальная составляющая силы давления воды на сегментный затвор, P_x	Н			
8	Глубина погружения верхней кромки затвора под свободную поверхность, ℓ	м			
9	Площадь прямоугольника, $S_{ПР}$	м ²			
10	Площадь треугольника, $S_{ТР}$	м ²			
11	Площадь сегмента, $S_{СЕГМ}$	м ²			
12	Объем тела давления, W_D	м ³			
13	Вертикальная составляющая силы давления воды на сегментный затвор, P_z	Н			
14	Теоретическое значение силы давления воды на сегментный затвор, P	Н			
15	Относительная погрешность в определении опытного значения силы давления на сегментный затвор, $\delta_{P_{on}}$	%			

Обработка опытных данных

Определить опытное значение силы гидростатического давления на сегментный затвор, исходя из условия равенства моментов сил P_{on} и G_{cp} относительно точки А. Так как плечо силы G_{cp} в два раза больше плеча силы P_{on} , то выполняется равенство:

$$P_{on} = 2G_{cp}, H$$

где: $G_{cp} = G_{cm} + G_6, H$ - вес груза;

$G_{cm} = 2,6H$ - вес стакана;

$G_6 = \rho g W, H$ - вес воды в стакане;

$W = Sh_6, м^3$ - объем воды в стакане;

$S = 0,05 \times 0,05 = 0,0025 м^2$ - площадь дна стакана;

$h_6, м$ - высота воды в стакане

Определить теоретическое значение силы гидростатического давления на сегментный затвор по формуле:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2},$$

$P_x = \rho g h_{\text{цм}}' \omega_x$, H - горизонтальная составляющая силы давления воды на сегментный затвор;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ - плотность воды;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения;

$\omega_x = a' \times b'$, м^2 - площадь проекции сегментного затвора на вертикальную плоскость;

$a' = 0,085 \text{ м}$, $b' = 0,05 \text{ м}$ - размеры проекции сегментного затвора на вертикальную плоскость,

$h_{\text{цм}}' = h - (0,031 + a'/2)$, м - глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции сегментного затвора под свободную поверхность.

$P_z = \gamma W_D$, H - вертикальная составляющая силы давления воды на сегментный затвор.

$\gamma = \rho g = 9810 \text{ Н/м}^3$ - удельный вес воды;

$W_D = (S_{\text{ПР}} + S_{\text{ТР}} + S_{\text{СЕГМ}})b'$, м^3 - объем тела давления.

$S_{\text{ПР}}$, $S_{\text{ТР}}$, $S_{\text{СЕГМ}}$, м^2 - площади прямоугольника, треугольника и сегмента – простых фигур, на которые разбивается сечение тела давления для нахождения его площади.

$$S_{\text{ПР}} = \ell \times c, \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{ТР}} = 1/2c \times a, \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{СЕГМ}} = 1/2r^2(\pi\beta/180 - \sin\beta), \text{ м}^2$$

$\ell = h - (0,031 + a')$, м - глубина погружения верхней кромки затвора под свободную поверхность;

$c = 0,13 \text{ м}$ - проекция криволинейной поверхности затвора на свободную поверхность;

$r = 0,16 \text{ м}$ - радиус кривизны;

$\beta = 70^\circ$ - угол, образуемый лучами, исходящими из центра кривизны и проходящими через верхнюю и нижнюю кромки затвора.

Определить относительную погрешность опытного значения силы гидростатического давления на сегментный затвор.

$$\delta_{P_{\text{он}}} = \frac{|P_{\text{он}} - P|}{P} 100\%$$

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 2.

Заключение

Сопоставить опытные и теоретические значения силы гидростатического давления воды на сегментный затвор. Объяснить имеющиеся расхождения

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Как определяется сила гидростатического давления на цилиндрические поверхности?
2. Что представляет собой и как определяется горизонтальная составляющая силы гидростатического давления на цилиндрическую поверхность?
3. Что представляет собой и как определяется вертикальная составляющая силы гидростатического давления на цилиндрическую поверхность?
4. Что такое тело давления?
5. Как определить направление вертикальной составляющей силы гидростатического давления на цилиндрическую поверхность?
6. Как проходит сила гидростатического давления по отношению к цилиндрической поверхности?
7. Как построить сечение тела давления?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Методы определения расхода жидкости

Цель работы: Ознакомиться с приборами и методами измерения расхода движущейся жидкости. Измерить расход воды объемным методом.

Краткие теоретические сведения

Расходом Q называется объем жидкости, проходящей в единицу времени через данное поперечное сечение потока.

Объемный метод измерения расхода состоит в том, что измеряют объем жидкости W и время t , в течение которого этот объем проходит через поперечное сечение потока.

Расход вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{W}{t}.$$

Весовой метод измерения расхода заключается в том, что измеряются масса жидкости m путем взвешивания и время t , в течение которого она проходит через поперечное сечение потока.

Расход вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{m}{\rho t},$$

где ρ - плотность жидкости.

И объемный, и весовой методы измерения расхода потока жидкости являются достаточно точными, но косвенными и применяются для измерения относительно небольших расходов.

Дросселирующие расходомеры: труба Вентури, диафрагменный и сопло (рисунок 18) получили широкое применение для измерения расхода жидкости и газа в трубопроводах.

Для определения расхода с помощью дросселирующих расходомеров по показаниям пьезометров находится перепад удельной потенциальной энергии ΔH_n , который возникает в приборе при сужении поперечного сечения. Расход Q вычисляется по формуле:

$$Q = \mu \omega_2 \sqrt{2g\Delta H_n},$$

где ω_2 - площадь наиболее узкого поперечного сечения расходомера;

μ - коэффициент расхода, учитывающий гидравлические сопротивления, особенности движения жидкости и конструкции расходомера (для стандартных приборов значение коэффициента расхода определяется по справочникам).

Мерный водослив (рисунок 19) позволяет измерять большие расходы жидкости, поэтому водосливы нашли широкое применение для измерения расхода воды, например в мелиоративных каналах.

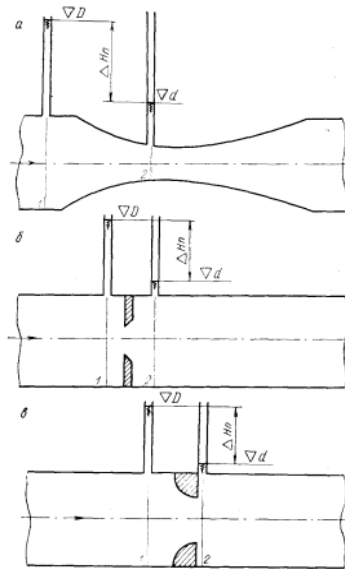


Рисунок 18 - Дросселирующие расходомеры: а – труба Вентури; б – диафрагменный; в – сопло

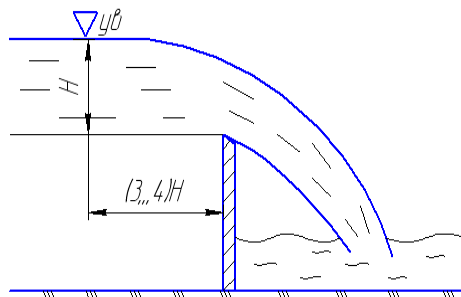


Рисунок 19 - Мерный водослив

Мерный водослив представляет собой тонкую стенку, через которую переливается жидкость. Верхняя кромка водослива называется гребнем водослива. Форма сливного отверстия в мерном водосливе бывает треугольная, прямоугольная или трапециевидальная.

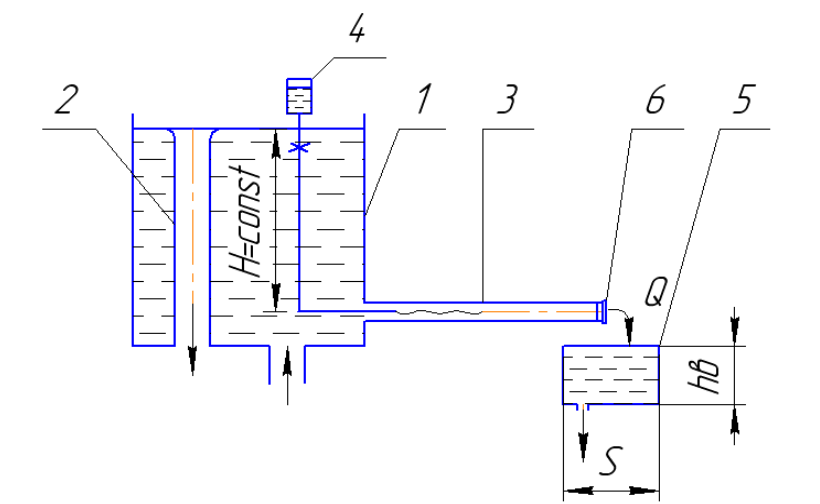
При определении расхода измеряется напор (превышение уровня свободной поверхности) над гребнем водослива H . Вблизи от водослива поверхность жидкости искривляется, поэтому напор измеряется на расстоянии $(3...4)H$ от водослива. Расход вычисляется по формуле:

$$Q = m\omega\sqrt{2gH},$$

где m - коэффициент расхода водослива,

ω - площадь сливного отверстия, соответствующая напору H .

Значения коэффициента расхода μ для водосливов, имеющих стандартные размеры, приводятся в справочниках.



1. Напорный бак; 2. Переливная труба; 3. Стеклянный трубопровод;
4. Запорное устройство; 5. Мерный бак

Рисунок 20 - Схема лабораторной установки

Порядок проведения работы

Наполнить напорный бак 1 водой до постоянного уровня, который обеспечивается переливной трубой 2 (рисунок 20). Открыть запорное устройство 4 и установить постоянный расход воды Q в трубопроводе 3. С помощью секундомера фиксировать время наполнения мерного бака 5 на высоту h_g . Повторить опыт несколько раз при различных значениях Q . Результаты измерений внести в таблицу 3.

Таблица 3 – Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Ед. изм.	Номер опыта		
			1	2	3
1	Высота воды в мерном баке, h_g	см			
2	Время наполнения мерного бака, t	с			
3	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
4	Расход воды в трубопроводе, Q	см ³ /с			

Обработка опытных данных

Определить расход воды объемным способом по формуле:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ см}^3 / \text{с},$$

где $W = Sh_g, \text{ см}^3$ - объем воды в мерном баке;

$t, \text{ с}$ - время наполнения мерного бака (по секундомеру);

$S = 200 \text{ см}^2$ - площадь дна мерного бака;

$h_g, \text{ см}$ - высота наполнения мерного бака.

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 3.

Заключение:

Перечислить методы измерения расхода жидкости, их достоинства и недостатки

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Что называют потоком жидкости?
2. Какие силы действуют при движении жидкости?
3. Какие виды движения жидкости вы знаете?
4. Что такое расход жидкости?
5. Каковы единицы измерения расхода жидкости?
6. Какие методы измерения расхода жидкости вы знаете?
7. Какую роль выполняет переливная труба?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Исследование уравнения Бернулли

Цель работы: На напорном трубопроводе переменного сечения сложной формы проследить по приборам характер изменения полного напора и отдельных его составляющих в соответствии с уравнением Бернулли. Построить напорную и пьезометрическую линии по опытным данным.

Краткие теоретические сведения



Даниил Берну́лли (*Daniel Bernoulli*; 29 января (8 февраля) 1700 — 17 марта 1782), швейцарский физик-универсал и математик, один из создателей кинетической теории газов, гидродинамики и математической физики. Академик и иностранный почётный член (1733) Петербургской академии наук, член Академий: Болонской (1724), Берлинской (1747), Парижской (1748), Лондонского королевского общества (1750).

Биография

Даниил родился в Гронингене (Голландия), где его отец тогда преподавал математику в университете. С юных лет увлёкся математикой, вначале учился у отца и брата Николая, параллельно изучая медицину. После возвращения в Швейцарию подружился с Эйлером.

1721: сдал экзамены на медика в Базеле, защитил диссертацию. Затем уехал в Италию, где

набирался опыта в медицине.

1725: вместе с братом Николаем уезжает по приглашению в Петербург, где по императорскому указу учреждена Петербургская академия наук. Занимается там медициной, но потом переходит на кафедру математики (1728), ставшую вакантной после смерти его брата Николая. Момент для приезда был чрезвычайно неудачным — как раз

скончался Пётр I, началась неразбериха. Приглашённые в Академию иностранцы частично рассеялись, но Даниил остался и даже уговорил приехать друга Эйлера (получил приглашение в 1726 году, прибыл в Санкт-Петербург в 1727 году). Но тут умерла императрица Екатерина I, и властям окончательно стало не до Академии. Вскоре Даниил вернулся в Базель (1733). Он остался почётным членом Петербургской академии, в её журнале опубликованы 47 из 75 трудов Даниила Бернулли. Во время пребывания в России он напечатал «Замечания о рекуррентных последовательностях» (1728) и подготовил свой главный труд: монографию «Гидродинамика» (опубликована в 1738 году).

1733: устроился профессором анатомии и ботаники в Базеле (других вакансий не было). Ведёт оживлённую, взаимно-полезную переписку с Эйлером.

1738: как результат многолетних трудов выходит фундаментальный труд «Гидродинамика». Среди прочего там основополагающий «закон Бернулли». Дифференциальных уравнений движения жидкости в книге ещё нет (их установил Эйлер в 1750-е годы).

1747—1753: важная серия работ о колебаниях струны. Бернулли, исходя из физических соображений, догадался разложить решение в тригонометрический ряд. Он провозгласил, что этот ряд не менее общий, чем степенной. Эйлер и Д'Аламбер выступили с возражениями. Вопрос был решён только в XIX веке, и Бернулли оказался прав.

1748: избран иностранным членом Парижской Академии наук.

1750: перешёл на кафедру физики Базельского университета, где и трудился до кончины в 1782 году. Дважды был избран ректором. Умер за рабочим столом весной 1782 года.

Женат не был. Отношения с отцом колебались от натянутых до враждебных, споры между ними о приоритете не утихали.

Научная деятельность

Более всего Даниил Бернулли прославился трудами в области математической физики и теории дифференциальных уравнений — его считают, наряду с Д'Аламбером и Эйлером, основателем математической физики.

Физик-универсал, он основательно обогатил кинетическую теорию газов, гидродинамику и аэродинамику, теорию упругости и т.д. Он первый выступил с утверждением, что причиной давления газа является тепловое движение молекул. В своей классической «Гидродинамике» он вывел уравнение стационарного течения несжимаемой жидкости (закон Бернулли), лежащее в основе динамики жидкостей и газов. С точки зрения молекулярной теории он объяснил закон Бойля-Мариотта.

Бернулли принадлежит одна из первых формулировок закона сохранения энергии (*живой силы*, как тогда говорили), а также (одновременно с Эйлером) первая формулировка закона сохранения момента количества движения (1746). Он много лет изучал и математически моделировал упругие колебания, ввёл понятие гармонического колебания, дал принцип суперпозиции колебаний.

В математике опубликовал ряд исследований по теории вероятностей, теории рядов, численным методам и дифференциальным уравнениям. Он первый применил математический анализ к задачам теории вероятностей (1768), до этого использовались

только комбинаторный подход. Бернулли продвинул также математическую статистику, рассмотрев с применением вероятностных методов ряд практически важных задач.

Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

Уравнение Бернулли для двух сечений потока реальной жидкости при установившемся плавно изменяющемся движении имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{mp1-2},$$

где z - геометрическая высота, т.е. расстояние от произвольной горизонтальной плоскости сравнения до рассматриваемой точки в сечении (индексы относятся к номерам сечений, проведенным нормально линиям тока); $\frac{p}{\rho g}$ - пьезометрическая высота, соот-

ветствующая абсолютному или избыточному давлению; $\frac{\alpha v^2}{2g}$ - скоростной напор;

h_{mp1-2} - потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений между сечениями 1-1 и 2-2, для которых составлено уравнение Бернулли; α - коэффициент кинетической энергии или коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей в рассматриваемых живых сечениях ($\alpha = 1,05-1,1$, для практических расчетов можно принимать $\alpha = 1$).

Все члены уравнения Бернулли имеют линейную размерность.

Сумма двух членов $z + \frac{p}{\rho g}$ называется **пьезометрическим напором** и обозначается

H_n . Линия, соединяющая концы отрезков $z + \frac{p}{\rho g}$ называется **пьезометрической линией**.

Сумма трех членов $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ называется **гидродинамическим напором** и

обозначается H . Линия, соединяющая концы отрезков $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ называется **напорной линией**.

Если от напорной линии сечения 1-1 провести горизонтальную прямую, то расстояние от этой прямой до напорной линии сечения 2-2 определит величину h_{mp1-2} (потери напора) (рисунок 21). Отношение потерь напора к длине, на которой они происходят, называют **гидравлическим уклоном**:

$$I = \frac{h_{mp}}{\ell}.$$

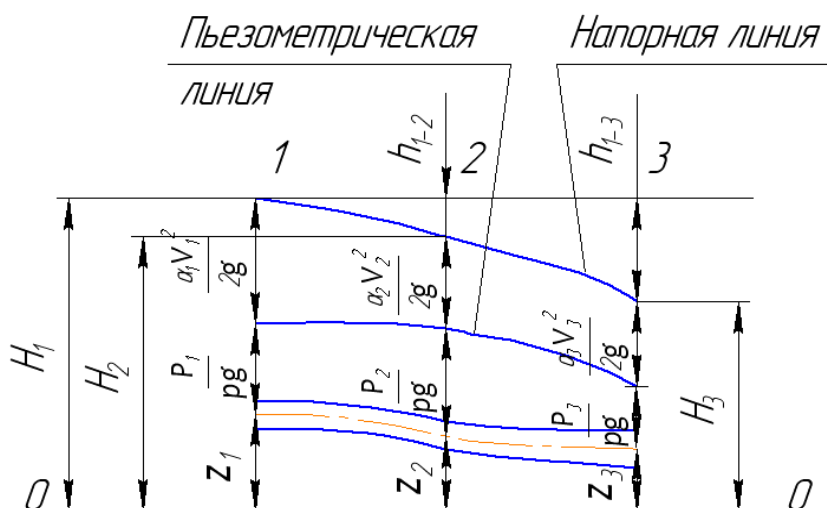


Рисунок 21 - Схема к иллюстрации уравнения Бернулли

Энергетическая интерпретация уравнения Бернулли

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии для двух живых сечений, для которых его составляют, по отношению к выбранной горизонтальной плоскости сравнения.

С энергетической точки зрения сумма $z_1 + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ выражает суммарную потенциальную $z_1 + \frac{p}{\rho g}$ и кинетическую $\frac{\alpha v^2}{2g}$ удельную энергию потока, т.е. энергию, отнесенную к единице веса жидкости; h_{mp1-2} - та часть удельной энергии, которая затрачивается на преодоление сил гидравлического сопротивления (трения) на пути от сечения 1-1 до сечения 2-2, обращаясь в тепловую энергию.

Если в уравнение Бернулли войдут две неизвестные, то следует применить также уравнение неразрывности для потока несжимаемой жидкости:

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = \dots = v \omega = Q = const,$$

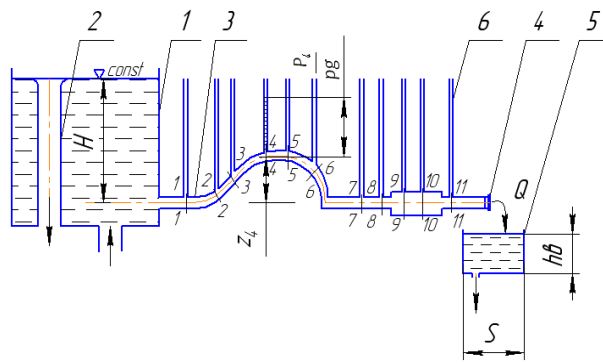
где ω - площадь живого сечения; v - средняя скорость по живому сечению.

При работе с уравнением Бернулли полезно руководствоваться следующими указаниями:

1. Уравнение Бернулли составляется для двух живых сечений потока относительно произвольной горизонтальной плоскости сравнения. Нумеровать сечения нужно так, чтобы жидкость двигалась от сечения 1-1 к сечению 2-2.

2. Одно из сечений рекомендуется брать там, где известны либо p , либо v , либо z , а другое там, где требуется определить одну из этих величин.

3. Горизонтальную плоскость сравнения удобно выбирать таким образом, чтобы исключить одну из z .



1. Напорный бак; 2. Переливная труба 3. Трубопровод; 4. Запорное устройство;
5. Мерный бак; 6. Пьезометры

Рисунок 22 - Схема лабораторной установки

Порядок проведения работы

Наполнить напорный бак 1 водой до постоянного уровня, который обеспечивается переливной трубой 2 (рисунок 22). Открыть запорное устройство 4 и установить в трубопроводе 3 постоянный расход Q . По показаниям пьезометров 6 записать значения потенциальной удельной энергии $z + \frac{p}{\rho g}$ в каждом сечении. Измерить с помощью линейки геометрическую высоту в сечениях 2-2, 3-3, 4-4, 5-5 и 6-6 трубопровода относительно горизонтальной плоскости сравнения, проведенной таким образом, чтобы значения z в сечениях 1-1, 7-7, 8-8, 9-9, 10-10, 11-11 были равны нулю. С помощью секундомера фиксировать время t наполнения мерного бака 5 водой на высоту h_0 . Результаты измерений внести в таблицу 4.

Таблица 4 – Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Ед. изм.	Номер сечения											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Пьезометрический напор, $H_n = z + \frac{p}{\rho g}$	см												
2	Геометрическая высота, z	см												
3	Пьезометрическая высота, $\frac{p}{\rho g}$	см												
4	Средняя скорость по сечению, v	см/с												
5	Скоростной напор, $\frac{\alpha v^2}{2g}$	см												
6	Гидродинамический напор, $H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$	см												
7	Потери напора, h_{mp}	см												

Обработка опытных данных

Цилиндрический трубопровод имеет переменное сечение по длине. Диаметр сечений 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6, 7-7, 8-8, 11-11 равен 9 мм, диаметр сечений 9-9 и 10-10 равен 20 мм.

Вычислить расход воды объемным способом:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ см}^3 / \text{с},$$

где W - объем воды в мерном баке; t - время наполнения мерного бака.

$$W = Sh_g, \text{ см}^3.$$

$S = 200 \text{ см}^2$ - площадь дна мерного бака;

$h_g, \text{ см}$ - высота воды в мерном баке.

Определить среднюю скорость в каждом из сечений по формуле:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \text{ см} / \text{с}$$

$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ см}^2$ - площадь живого сечения напорного трубопровода.

По показаниям пьезометров записать пьезометрический напор в каждом сечении трубопровода: $H_n = z + \frac{p}{\rho g}, \text{ см}$. Определить пьезометрическую высоту как разность пьезометрического напора и геометрической высоты: $\frac{p}{\rho g} = H_n - z, \text{ см}$. Просчитать скорост-

ной напор в каждом сечении $\frac{\alpha v^2}{2g}, \text{ см}$. Вычислить гидродинамический или полный

напор в каждом сечении: $H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}, \text{ см}$ и потери напора между каждыми двумя

сечениями: $h_{mp1-2} = H_1 - H_2, \text{ см}$.

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 4.

Построить графики напорной $H = f_1(L)$, пьезометрической $H_n = f_2(L)$ и геометрической $z = f_3(L)$ линий. Для этого по оси абсцисс отложить расстояние L данного сечения от начального вдоль оси потока, а по оси ординат – соответствующие напоры.

Построенные линии наглядно демонстрируют перераспределение энергии в различных сечениях вдоль потока в соответствии с уравнением Бернулли.

Заключение

Указать, от каких факторов зависит гидродинамический напор и как он изменяется вдоль потока движущейся жидкости.

Вопросы к защите лабораторной работы

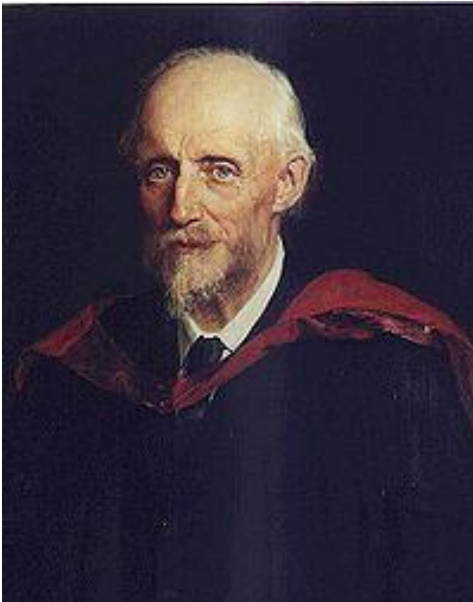
1. В чем заключается различие между уравнениями Бернулли для элементарной струйки и потока реальной жидкости? Напишите оба этих уравнения.
2. Дайте геометрическую интерпретацию уравнения Бернулли для установившегося плавно изменяющегося движения реальной жидкости.
3. В чем состоит энергетический смысл уравнения Бернулли для потока реальной жидкости?
4. Как построить напорную и пьезометрическую линии?
Объясните физический смысл коэффициента кинетической энергии (коэффициента Кориолиса) α ?
5. Как определяются гидравлический и пьезометрический уклоны?
6. Как записывается уравнение неразрывности для потока несжимаемой жидкости при установившемся движении?
7. Какие расчетные формулы могут быть выведены из уравнения Бернулли?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

Исследование режимов движения жидкости

Цель работы: Установить опытным путем наличие ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости. Определить число Рейнольдса для каждого режима движения и сравнить его с критическим значением числа Рейнольдса.

Краткие теоретические сведения



Осборн Рейнольдс (англ. *Osborne Reynolds*; 23 августа 1842, Белфаст — 21 февраля 1912, Уотчет, графство Сомерсет) — английский инженер и физик, специалист в области гидравлики.

Биография

Родился 23 августа 1842 года в Белфасте в семье священнослужителя. С 18 лет работал в механической мастерской. Окончил Кембриджский университет в 1867 году. С 1868 года по 1905 год был профессором кафедры строительной механики Манчестерского университета. С 1888 года возглавлял Витвортовскую инженерную лабораторию.

Научная деятельность

Изучал течение жидкости в ламинарном и турбулентном режиме. В 1883 году установил, что ламинарное течение переходит в турбулентное, когда введенная им безразмерная величина превышает критическое значение. В честь его работ назван критерий перехода от одного режима к другому — число Рейнольдса. Также Рейнольдс определил механический эквивалент теплоты.

Английский ученый О. Рейнольдс в 1883 году окончательно установил, что режим (характер) движения жидкости может быть принципиально различным.

Если частицы жидкости движутся по прямолинейным траекториям, создавая как бы отдельные слои, то такой режим называется **ламинарным**.

Если в потоке наблюдается пульсация местных скоростей, активное перемешивание слоев, то такой режим называется **турбулентным**.

Вид режима движения жидкости определяют с помощью безразмерного критерия Рейнольдса:

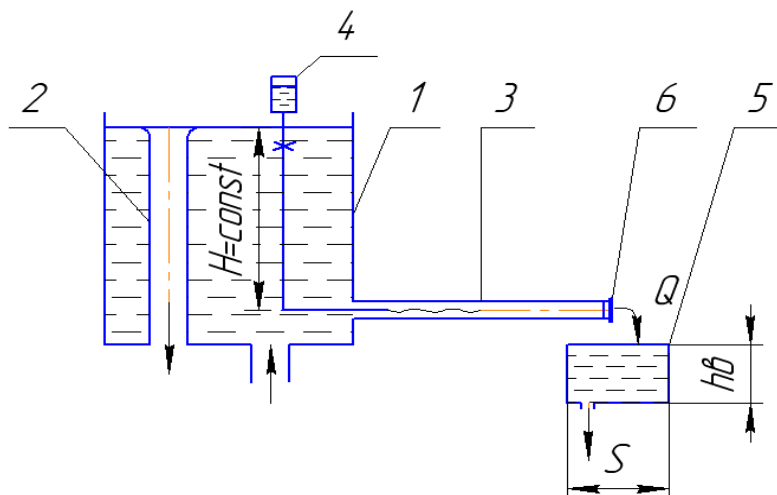
$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

где v - средняя скорость движения жидкости в трубопроводе; d - диаметр трубопровода; ν - коэффициент кинематической вязкости жидкости.

В трубах круглого сечения в среднем при $Re < 2300$ (нижнее критическое число) имеет место устойчивый ламинарный режим движения, а при $Re > 4000$ (верхнее критическое число) – устойчивый турбулентный режим.

Если $2300 < Re < 4000$, то наблюдается неустойчивая (переходная) область. При этом в потоке возникают пульсации, которые постепенно затухают, т.е. на отдельных участках потока ламинарный и турбулентный режим сменяют друг друга.

Как в природе, так и в технике имеет место в основном турбулентный режим движения жидкостей. Ламинарный режим наблюдается при движении жидкостей повышенной вязкости (нефти, битума, мазута, смазочных масел и др.), а также при движении жидкостей в трубках малого диаметра (капиллярах, порах грунта).



1. Напорный бак; 2. Переливная труба; 3. Стеклянная труба;
4. Сосуд с окрашенной жидкостью; 5. Мерный бак; 6. Запорное устройство

Рисунок 23 – Схема лабораторной установки

Порядок проведения работы

Наполнить напорный бак 1 водой до постоянного уровня, который обеспечивается переливной трубой 2 (рисунок 23). Измерить температуру воды в баке. С помощью запорного устройства 6 установить постоянный расход Q воды в стеклянном трубопроводе 3. Впустить струйку окрашенной жидкости 4 в стеклянную трубу и визуально

наблюдать установившийся режим движения. Для определения расхода воды объемным способом фиксировать с помощью секундомера время наполнения мерного бака 5 на высоту h_6 . Провести аналогичные действия при других скоростях движения воды в стеклянном трубопроводе, добиваясь поочередно установления ламинарного и турбулентного режимов движения. Результаты измерений внести в таблицу 5.

Таблица 5 - Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Един. изм.	Номер опыта		
			1	2	3
1	Высота воды в мерном баке, h_6	см			
2	Время наполнения мерного бака, t	с			
3	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
4	Расход воды в трубопроводе, Q	см ³ /с			
5	Средняя скорость движения воды в трубопроводе, v	см/с			
6	Число Рейнольдса, Re				
7	Режим движения жидкости				

Обработка опытных данных

Диаметр стеклянного трубопровода $d = 27 \text{ мм}$

Определить расход воды объемным способом по формуле:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ см}^3 / \text{с},$$

где W - объем воды в мерном баке; t - время наполнения мерного бака.

$$W = Sh_6, \text{ см}^3.$$

$S = 200 \text{ см}^2$ - площадь дна мерного бака;

$h_6, \text{ см}$ - высота воды в мерном баке.

Вычислить среднюю скорость движения воды в стеклянном трубопроводе по формуле:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \text{ см} / \text{с}$$

$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ см}^2$ - площадь живого сечения стеклянной трубы.

Определить число Рейнольдса для круглых напорных труб: $Re = \frac{vd}{\nu}$

Коэффициент кинематической вязкости воды установить по таблице 6.

Установить режим движения жидкости в соответствии с критическим числом Рейнольдса.

Таблица 6 - Значения кинематической вязкости воды ν в зависимости от температуры

$t, ^\circ \text{C}$	$\nu, \text{ см}^2 / \text{с}$
10	0,0131
12	0,0124
15	0,0114
16	0,0112

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 5

Заключение

Произвести описание характера движения жидкости при различных числах Рейнольдса

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Какой режим движения жидкости называется ламинарным, а какой турбулентным?
2. Что такое переходная или неустойчивая зона?
3. Какая скорость называется критической?
4. Как определяется число Рейнольдса для напорных круглых труб?
5. Как меняется режим движения жидкости при изменении ее температуры?
6. Какой вид имеет эпюра скоростей потока при ламинарном и турбулентном режимах?
7. Запишите формулы для определения верхней и нижней критических скоростей
8. Для чего необходимо знать режим движения жидкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

Изучение коэффициента гидравлического сопротивления

Цель работы: Определить коэффициент гидравлического сопротивления λ при различных режимах движения жидкости

Краткие теоретические сведения

Гидравлические сопротивления (потери напора) существенно зависят от режима движения жидкости.

Соответственно видам гидравлических сопротивлений потери напора разделяют на потери напора по длине $h_{o.l}$ и местные потери напора h_m .

Потери напора по длине для круглых труб вычисляют по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_{o.l} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g},$$

где λ - коэффициент гидравлического сопротивления (коэффициент Дарси), ℓ - длина трубопровода, d - диаметр трубопровода, v - средняя скорость движения потока в трубе, g - ускорение свободного падения.

Эта формула действительна как для ламинарного, так и для турбулентного режима. Различными в этих случаях будут расчетные выражения для коэффициента Дарси λ , от правильного выбора величины которого зависит точность гидравлических расчетов.

При ламинарном режиме движения коэффициент Дарси λ определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

При турбулентном режиме движения выразить величину λ сложнее. Здесь λ может зависеть как от числа Рейнольдса Re , так и от относительной шероховатости $\frac{\Delta}{d}$, где Δ - абсолютная или эквивалентная шероховатость. Под эквивалентной шероховатостью понимают высоту выступов равнозернистой шероховатости из однородного

песка, при которой в квадратичной области сопротивления получают такое же значение λ , что в рассматриваемой трубе с технической шероховатостью.

Закон изменения коэффициента Дарси λ в каждой из трех областей турбулентного режима движения различный.

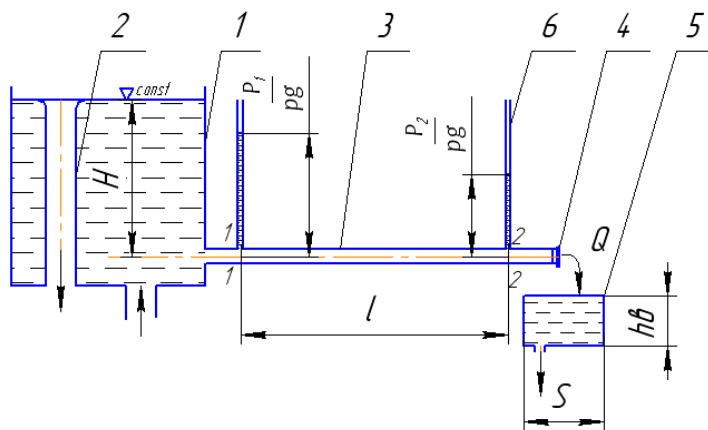
В области гидравлически гладких стенок коэффициент Дарси зависит только от числа Рейнольдса $\lambda = f(\text{Re})$. Здесь применяют формулу Блазиуса: $\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}$, которая справедлива при $\text{Re}_{кр} < \text{Re} < 10^5$ или формулу Кольбрука:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re} - 1,52)^2}, \text{ которая дает хорошие результаты при } \text{Re}_{кр} < \text{Re} < 3 \times 10^6.$$

В переходной (доквадратичной) области гидравлического сопротивления коэффициент Дарси λ является функцией числа Рейнольдса и относительной шероховатости $\lambda = f(\text{Re}, \frac{\Delta}{d})$. Определить его можно по универсальной формуле Альтшуля:

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

В квадратичной области сопротивления λ зависит только от относительной шероховатости $\lambda = f(\frac{\Delta}{d})$. Здесь применяют формулу Шифринсона: $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$ или формулу Прандля-Никурадзе: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg 0,27 \frac{\Delta}{d}$.



1. Напорный бак, 2. Переливная труба, 3. Трубопровод, 4. Запорное устройство,
5. Мерный бак, 6. Пьезометр

Рисунок 24 - Схема лабораторной установки

Порядок проведения работы

Наполнить напорный бак 1 водой до постоянного уровня, который обеспечивается переливной трубой 2 (рисунок 24). Записать величину постоянного напора H . Измерить температуру воды t . Проверить правильность работы пьезометров 6. Открыть запорное устройство 4 и установить постоянный расход воды Q в трубопроводе 3. С помощью секундомера фиксировать время наполнения мерного бака 5 на высоту h_6 . Из-

мерить длину опытного участка ℓ и снять показания начального и конечного пьезометров h_1, h_2 . Повторить опыт несколько раз при различных значениях Q . Результаты измерений внести в таблицу 7.

Таблица 7 - опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Ед. изм.	Номер опыта		
			1	2	3
1	Величина постоянного напора, H	см			
2	Время наполнения мерного бака, t	с			
3	Уровень воды в мерном баке, h_6	см			
4	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
5	Расход воды в трубе, Q	см ³ /с			
6	Скорость воды в трубе, v	см/с			
7	Показания пьезометров, h_1, h_2	см			
8	Потери напора на участке ℓ , $h_{\text{ол}} = h_2 - h_1$	см			
9	Опытное значение коэффициента Дарси, $\lambda_{\text{оп}}$				
10	Теоретическое значение коэффициента Дарси, $\lambda_{\text{ТЕОР}}$				
11	Погрешность, $\delta_{\lambda_{\text{оп}}}$	%			

Обработка опытных данных

Диаметр трубы $d = 1,3\text{см}$, эквивалентная шероховатость $\Delta = 0,02\text{мм}$. Определить расход воды в трубе объемным способом:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{см}^3 / \text{с}.$$

$W = Sh_6, \text{см}^3$ - объем воды в мерном баке.

$S = 200\text{см}^2$ - площадь поперечного сечения мерного бака,

$h_6, \text{см}$ - высота воды в мерном баке,

$t, \text{с}$ - время наполнения мерного бака.

Вычислить среднюю скорость движения воды в трубе по формуле:

$$v = Q / \omega, \text{см} / \text{с},$$

где $\omega = \pi d^2 / 4, \text{см}^2$ - площадь живого сечения потока.

Определить число Рейнольдса из выражения:

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}.$$

Найти значение кинематической вязкости воды ν по таблице 6 (лабораторная работа «Исследования режимов движения жидкости»).

Установить режим движения жидкости в соответствии с числом Рейнольдса. Если $\text{Re} < \text{Re}_{\text{кр}} = 2320$ - режим движения ламинарный, если $\text{Re} > \text{Re}_{\text{кр}} = 2320$ - режим движения турбулентный.

Выразить опытное значение коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{\text{ОП}}$

из формулы Дарси-Вейсбаха: $h_{\text{от}} = \lambda \frac{\ell v^2}{d 2g}$:

$$\lambda_{\text{ОП}} = \frac{h_{\text{от}} d 2g}{\ell v^2},$$

где $h_{\text{от}} = h_1 - h_2, \text{ см}$ - разность показаний пьезометров в начале и в конце опытного участка.

Определить теоретическое значение коэффициента Дарси $\lambda_{\text{ТЕОР}}$ по одной из формул, приведенных в разделе «Краткие теоретические сведения» в соответствии с режимом движения и областью сопротивления.

Определить относительную погрешность опытного значения коэффициента Дарси $\lambda_{\text{ОП}}$:

$$\delta_{\lambda_{\text{ОП}}} = \frac{|\lambda_{\text{ОП}} - \lambda_{\text{ТЕОР}}|}{\lambda_{\text{ТЕОР}}} 100\%$$

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 7.

Заключение:

Сопоставить значения $\lambda_{оп}$ и $\lambda_{теор}$. Объяснить имеющиеся расхождения.

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Как записывается формула Дарси-Вейсбаха при определении потерь напора по длине трубопровода?
2. Какие области сопротивления наблюдаются в турбулентном режиме движения?
3. От чего зависит коэффициент Дарси в каждой области сопротивления при турбулентном режиме движения?
4. Как определяется коэффициент Дарси при ламинарном режиме движения?
5. Как определяется коэффициент Дарси при турбулентном режиме движения?
6. Что такое эквивалентная шероховатость?
7. Что такое ламинарная пленка?
8. Какие трубы называют гидравлически гладкими, а какие гидравлически шероховатыми?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

Определение потерь напора в местных сопротивлениях

Цель работы: Определить потери напора при внезапном расширении и внезапном сужении трубопровода

Краткие теоретические сведения

Местные сопротивления – относительно короткие участки русла, в которых происходит значительное изменение эпюры скоростей потока и ее последующее восстановление до формы, соответствующей равномерному движению (расширяющиеся и сужающиеся участки трубопровода – диффузоры и конфузоры, повороты в виде колен и отводов, диафрагмы, задвижки, краны, вентили, дроссельные заслонки, клапаны и т.п.).

На этих участках русла увеличиваются градиенты местных скоростей, образуются вихревые зоны, увеличивается интенсивность перемешивания масс жидкости. В результате возрастают вязкостные и инерционные силы сопротивления, препятствующие движению жидкости.

Потери напора между сечениями 1-1 и 2-2 в общем виде могут быть получены из уравнения Бернулли для потока реальной жидкости при плавно изменяющемся движении:

$$h_{mp} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right).$$

Все потери напора (и местные, и по длине) выражаются в общем виде по формуле Вейсбаха:

$$h_{mp} = \zeta \frac{v^2}{2g},$$

т.е. через скоростной напор. Коэффициент потерь ζ показывает долю скоростного напора, затрачиваемого на преодоление данного сопротивления.

При определении местной потери напора записывают:

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g},$$

где ζ_m - коэффициент сопротивления для данного местного сопротивления.

Потерянный напор при внезапном расширении (рисунок 25 а) можно подсчитать по формуле Борда:

$$h_{ep} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g},$$

где $(v_1 - v_2)$ - потерянная скорость, g - ускорение свободного падения.

Потерянный напор при внезапном сужении (рисунок 25 б) можно подсчитать по формуле:

$$h_{ec} = \zeta_{ec} \frac{v_2^2}{2g},$$

где ζ_{ec} - коэффициент внезапного сужения;

v_2 - средняя скорость в меньшем сечении.

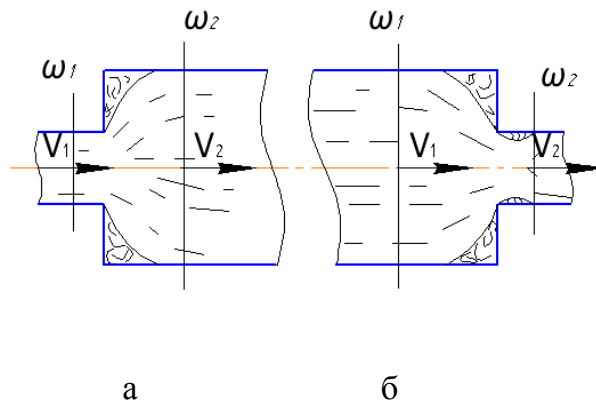
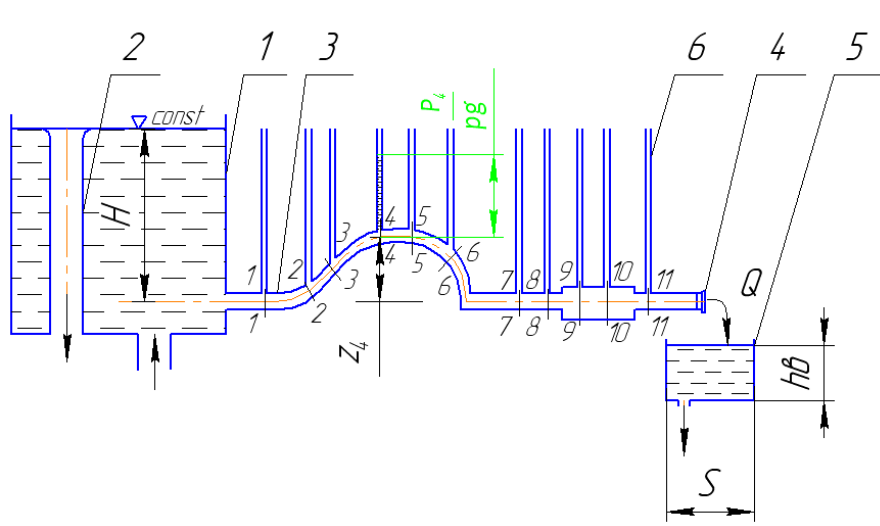


Рисунок 25 - Примеры местных сопротивлений
(а - внезапное расширение потока; б - внезапное сужение потока)



1. Напорный бак; 2. Переливная труба; 3. Трубопровод;
4. Запорное устройство; 5. Мерный бак; 6. Пьезометры

Рисунок 26- Схема лабораторной установки

Порядок проведения работы

Наполнить напорный бак 1 водой до постоянного уровня, который обеспечивается переливной трубой 2 (рисунок 26). Открыть запорное устройство 4 и установить в трубопроводе 3 постоянный расход Q . Совместить плоскость сравнения с горизонтальной осью трубопровода и снять показания пьезометров 6 в сечениях 8-8, 9-9, 10-10 и 11-11. Для определения расхода воды объемным способом фиксировать с помощью секундомера время t наполнения мерного бака 5 на высоту h_6 . Повторить опыт несколько раз при различных значениях Q . Результаты измерений внести в таблицу 8.

Таблица 8 - Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Един. изм.	Номер опыта		
			1	2	3
1	Время наполнения мерного бака, t	с			
2	Высота наполнения мерного бака, h_e	см			
3	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
4	Расход воды, Q	см ³ /с			
5	Пьезометрический напор в сечениях: 8-8, 9-9, 10-10 и 11-11 $H_n = z + \frac{p}{\rho g}$	см			
6	Средняя скорость, v	см/с			
7	Скоростной напор, $\frac{v^2}{2g}$	см			
8	Гидродинамический напор, $H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$	см			
9	Опытный потерянный напор при внезапном расширении, $h_{ep}^{on} = (z_8 + \frac{p_8}{\rho g} + \frac{v_8^2}{2g}) - (z_9 + \frac{p_9}{\rho g} + \frac{v_9^2}{2g})$	см			
10	Теоретический потерянный напор при внезапном расширении, $h_{ep}^m = \frac{(v_8 - v_9)^2}{2g}$	см			
11	$K_{ep} = \frac{h_{ep}^{on}}{h_{ep}^m}$				
12	Опытный потерянный напор при внезапном сужении, $h_{ep}^{on} = (z_{10} + \frac{p_{10}}{\rho g} + \frac{v_{10}^2}{2g}) - (z_{11} + \frac{p_{11}}{\rho g} + \frac{v_{11}^2}{2g})$	см			
13	Теоретический потерянный напор при внезапном сужении, $h_{ec}^m = \zeta_{ec} \frac{v_{11}^2}{2g}$	см			
14	$K_{ec} = \frac{h_{ec}^{on}}{h_{ec}^m}$				

Обработка опытных данных

Исследовать участок трубопровода между сечениями 8-8 и 11-11 (рисунок 26). На этом участке имеется два вида местных сопротивлений: внезапное расширение и внезапное сужение потока. Диаметр трубопровода в сечениях 8-8 и 11-11 равен 9мм, диаметр трубопровода в сечениях 9-9 и 10-10 равен 20мм.

Вычислить расход воды объемным способом:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ см}^3 / \text{с},$$

где W - объем воды в мерном баке; t - время наполнения мерного бака.

$$W = Sh_g, \text{ см}^3.$$

$S = 200 \text{ см}^2$ - площадь дна мерного бака;

$h_g, \text{ см}$ - высота воды в мерном баке.

Определить среднюю скорость движения воды в каждом сечении по выражению:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \text{ см} / \text{с}$$

где $\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ см}^2$ - площадь живого сечения напорного трубопровода.

Просчитать гидродинамический напор в сечениях 8-8, 9-9, 10-10, 11-11 по фор-

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

Вычислить опытное значение потеряннного напора при внезапном расширении трубопровода, исходя из уравнения Бернулли:

$$h_{ep}^{on} = \left(z_8 + \frac{p_8}{\rho g} + \frac{\alpha_8 v_8^2}{2g} \right) - \left(z_9 + \frac{p_9}{\rho g} + \frac{\alpha_9 v_9^2}{2g} \right), \text{ см}$$

Вычислить теоретическое значение потеряннного напора при внезапном расшире-
нии по формуле Борда:

$$h_{ep}^m = \frac{(v_8 - v_9)^2}{2g}, \text{ см}$$

Оценить расхождение опытных и теоретических потерь напора при внезапном расширении трубопровода коэффициентом K_{ep} :

$$K_{ep} = \frac{h_{ep}^{on}}{h_{ep}^m}.$$

Вычислить опытное значение потеряннного напора при внезапном сужении тру-
бопровода по уравнению Бернулли:

$$h_{\text{вс}}^{\text{он}} = \left(z_{10} + \frac{p_{10}}{\rho g} + \frac{\alpha_{10} v_{10}^2}{2g} \right) - \left(z_{11} + \frac{p_{11}}{\rho g} + \frac{\alpha_{11} v_{11}^2}{2g} \right), \text{ см}$$

Определить теоретический потерянный напор при внезапном сужении по формуле:

$$h_{\text{вс}}^{\text{м}} = \zeta_{\text{вс}} \frac{v_{11}^2}{2g}, \text{ см}$$

где $\zeta_{\text{вс}} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2$.

$$\text{Коэффициент сжатия потока } \varepsilon = \frac{\omega_{\text{сжс}}}{\omega} = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n},$$

где $n = \frac{\omega_{11}}{\omega_{10}}$ - степень сжатия потока.

Оценить расхождение опытных и теоретических потерь напора при внезапном сужении трубопровода коэффициентом $K_{\text{вс}} = \frac{h_{\text{вс}}^{\text{он}}}{h_{\text{вс}}^{\text{м}}}$

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 8.

Заключение

Сопоставить значения потеряннного напора при внезапном расширении и внезапном сужении потока, полученные опытным путем и теоретические.

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Приведите примеры местных сопротивлений.
2. Запишите формулу Вейсбаха для определения потерь напора в общем виде.
3. Запишите, как определяют потери напора в общем виде из уравнения Бернулли для потока реальной жидкости при плавно изменяющемся движении.
4. Как определяются местные потери напора?
5. Как определяют коэффициент местного сопротивления ζ_m для различных видов местных сопротивлений?
6. Для чего нужно знать значение коэффициента местного сопротивления?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

Определение расхода жидкости при истечении через насадки в атмосферу при постоянном напоре

Цель работы: Определить опытным путем расход Q и коэффициент скорости φ при истечении воды в атмосферу через незатопленные насадки различных типов

Краткие теоретические сведения

Насадком называется короткая напорная трубка, плотно присоединенная к отверстию в тонкой стенке. Длина насадка $\ell = (3...5)d$, где d - внутренний диаметр насадка.

Различают следующие основные типы насадков: цилиндрический внешний (насадок Вентури), цилиндрический внутренний (насадок Борда), конический сходящийся, конический расходящийся и коноидальный (насадок, имеющий форму струи жидкости, вытекающей из отверстия в тонкой стенке).

Истечение жидкости через отверстия и насадки может происходить при постоянном или переменном напорах и быть свободным (в атмосферу) или несвободным (под уровень жидкости).

При постоянном напоре расход жидкости через незатопленный насадок определяется по формуле:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH},$$

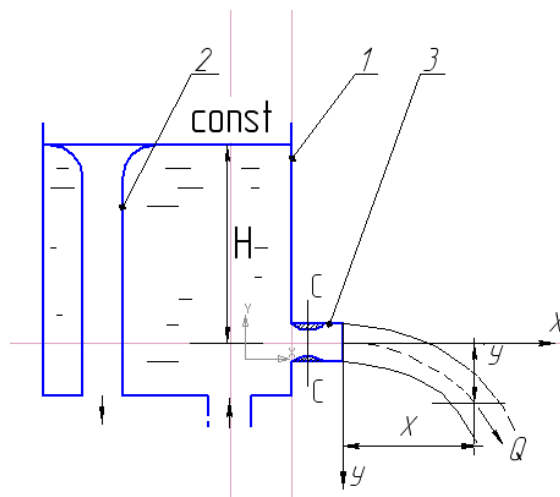
а скорость по формуле:

$$v = \varphi\sqrt{2gH},$$

где μ - коэффициент расхода ($\mu = \varphi\varepsilon$); φ - коэффициент скорости; ε - коэффициент сжатия струи; ω - площадь выходного отверстия; H - напор над центром насадка.

Справочные значения коэффициентов скорости φ и коэффициентов сжатия ε для различных типов насадков:

1. Цилиндрический внешний: $\varphi=0,82$; $\varepsilon=1$
2. Цилиндрический внутренний: $\varphi=0,97$; $\varepsilon=0,53$
3. Конический сходящийся: $\varphi=0,97$; $\varepsilon=0,98$
4. Конический расходящийся: $\varphi=0,45$; $\varepsilon=1$
5. Коноидальный: $\varphi=0,97$; $\varepsilon=1$



1. Напорный бак; 2. Переливная труба; 3. Насадок
Рисунок 27- Схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

В боковой стенке напорного бака 1 имеется отверстие с резьбой, в которое поочередно вставляются исследуемые насадки 3 (рисунок 27). Наполнить напорный бак водой до постоянного уровня, который обеспечивается переливной трубой 2. Измерить напор над центром насадка H . Открыть запорное устройство насадка и измерить координаты: x - дальность отлета струи и y - высоту падения струи. Повторить опыт для каждого типа насадка. Результаты измерений внести в таблицу 9.

Таблица 9 - Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Един. изм.	Тип насадка		
			Цилинд. внешний	Конич. сходящ.	Коноид.
1	Постоянный напор над центром насадка, H	см			
2	Площадь сечения насадка на выходе, ω	см ²			
3	Расход через насадок, Q	см ³ /с			
4	Дальность отлета струи, x .	см			
5	Высота падения струи, y	см			
6	Опытное значение коэффициента скорости, $\varphi_{оп}$				
7	Справочное значение коэффициента скорости, $\varphi_{спр}$				
8	Относительная погрешность, $\delta_{\varphi_{оп}}$	%			

Обработка опытных данных

Имеются три типа насадков: цилиндрический внешний, конический сходящийся и коноидальный. Диаметр каждого на выходе равен соответственно:

- цилиндрический внешний: $d = 11\text{мм}$;
- конический сходящийся: $d = 11\text{мм}$;
- коноидальный: $d = 12\text{мм}$.

Определить расход через каждый из насадков по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH},$$

где $\mu = \varphi \varepsilon$ коэффициент расхода (взять справочные значения);

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ см}^2 - \text{площадь сечения насадка на выходе};$$

$$g = 981 \text{ см/с}^2 - \text{ускорение свободного падения};$$

$H, \text{ см}$ - постоянный напор над центром насадка.

Определить опытное значение коэффициента скорости по формуле:

$$\varphi_{оп} = \frac{x}{2\sqrt{yH}},$$

где $x, \text{ см}$ - дальность отлета струи;

$y, \text{ см}$ - высота падения струи.

Полученное значение $\varphi_{оп}$ сравнить со справочным и найти относительную погрешность в определении $\varphi_{оп}$:

$$\delta_{\varphi_{оп}} = \frac{|\varphi_{оп} - \varphi_{спр}|}{\varphi_{спр}} 100\%$$

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 9.

Заключение

Сопоставить опытные и справочные значения коэффициентов скорости для различных типов насадков. Объяснить имеющиеся расхождения.

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Назовите условия истечения жидкости из отверстий и насадков.
2. Какие виды отверстий различают по относительной величине отверстия и относительной толщине стенки?
3. Какое сечение называется сжатым, каким коэффициентом характеризуется сжатие струи?
4. Какое сжатие называется совершенным, а какое несовершенным?
5. Как взаимосвязаны расход, напор и другие гидравлические характеристики при истечении жидкости через отверстия в тонкой стенке и насадки при постоянном напоре?
6. Какие типы насадков вы знаете?
7. Какова связь между коэффициентами расхода, скорости и сжатия струи?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11

Изучение истечения жидкости через насадки в атмосферу при переменном напоре

Цель работы: Определить опытным путем время изменения уровня воды в призматическом резервуаре от отметки H_1 до отметки H_2 при отсутствии притока

Краткие теоретические сведения

Истечение при переменном напоре происходит тогда, когда уровень в резервуаре (сосуде, водохранилище, другой какой-либо емкости), из которого вытекает жидкость, изменяется в течение времени.

Истечение жидкости при переменном напоре, так же как и при постоянном, может происходить из незатопленных или затопленных отверстий, через различные насадки и короткие трубопроводы.

Истечение при переменном напоре является движением неустановившимся.

Основной практической задачей изучения жидкости при переменном напоре является определение времени опорожнения или наполнения различных сосудов, резервуаров, цистерн, водохранилищ и т.д.

С точки зрения условий, в которых происходит истечение, различают истечение при постоянном притоке в резервуар, из которого вытекает жидкость и без притока.

Время изменения уровня жидкости в призматическом сосуде от напора над центром отверстия H_1 до напора H_2 при наличии притока Q_n (ему соответствует H_n) определяется по формуле:

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_n} \ln \frac{\sqrt{H_n} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_n} - \sqrt{H_2}}),$$

где Ω - площадь поперечного сечения призматического резервуара;

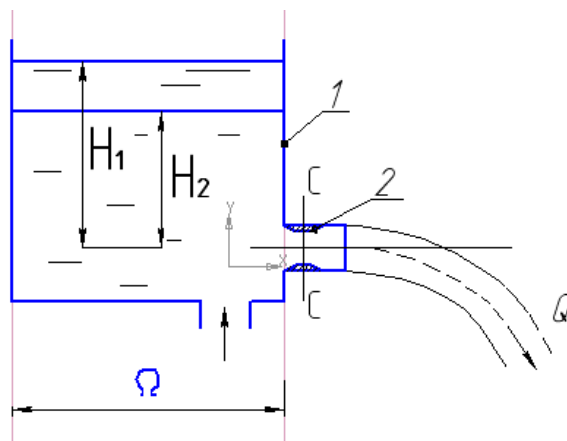
μ - коэффициент расхода;

ω - площадь отверстия либо насадка на выходе.

Эта формула относится к случаям маловязких жидкостей (например, воды) и справедлива как для случаев понижения уровня жидкости в сосуде, так и для случаев подъема уровня. По ней определяют время истечения из призматического сосуда при переменном напоре в атмосферу или при постоянном верхнем уровне под переменный нижний уровень.

При отсутствии притока ($Q_n = 0; H_n = 0$) формула упрощается и имеет вид:

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}).$$



1. Напорный бак; 2. Насадок

Рисунок 28 – Схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

В боковой стенке напорного призматического бака 1 имеется отверстие с резьбой, в которое поочередно вставляются исследуемые насадки 2 (рисунок 28). Наполнить напорный бак водой до уровня H_1 и исключить приток Q_n . Открыть запорное устройство насадка и синхронно включить секундомер. Измерить время уменьшения уровня воды от H_1 до H_2 . Повторить опыт для каждого типа насадка. Результаты измерений внести в таблицу 10.

Таблица 10 - Опытные данные

№ п/п	Наименование величин	Един. изм.	Тип насадка		
			Цилин. внешн	Конич. сход.	Коноидальн
1	Первоначальный уровень, H_1	см			
2	Конечный уровень, H_2	см			
3	Площадь насадка на выходе, ω	см ²			
4	Опытное время, $t_{оп}$	с			
5	Теоретическое время, $t_{теор}$	с			
6	Относительная погрешность, $\delta_{t_{оп}}$	%			

Обработка опытных данных

Имеем три типа насадков: цилиндрический внешний, конический сходящийся и коноидальный. Диаметр каждого на выходе равен соответственно:

- цилиндрический внешний: $d = 11\text{мм}$;
- конический сходящийся: $d = 11\text{мм}$;
- коноидальный: $d = 12\text{мм}$.

Напорный бак призматический. Время изменения уровня воды в нем от отметки H_1 до отметки H_2 , определить по секундомеру. Это опытное время $t_{оп}$.

Теоретическое время изменения уровня воды в резервуаре от H_1 до H_2 определить по формуле:

$$t_{TEOP} = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}),$$

где $\Omega = 1500 \text{ см}^2$ – площадь поперечного сечения призматического напорного бака;

μ – справочный коэффициент расхода насадка (для цилиндрического внешнего $\mu = 0,82$, для конического сходящегося $\mu = 0,94$, для коноидального $\mu = 0,97$);

$\omega = \frac{\pi d^2}{4} \text{ см}^2$ – площадь насадка на выходе;

H_1 – первоначальный уровень воды в напорном баке;

H_2 – конечный уровень воды в напорном баке.

Относительную погрешность в определении $t_{оп}$ найти по формуле:

$$\delta_{t_{оп}} = \frac{|t_{оп} - t_{TEOP}|}{t_{TEOP}} 100\%$$

Вычисления:

Результаты вычислений внести в таблицу 10

Заключение

Сопоставить опытные и теоретические значения времени изменения уровня воды от H_1 до H_2 при различных типах насадков. Объяснить имеющиеся расхождения.

Вопросы к защите лабораторной работы

1. Какое движение жидкости называется неустановившимся?
2. Какой резервуар называется призматическим, а какой непризматическим?
3. Как различают истечения с точки зрения условий, в которых они происходят?
4. Что такое постоянный напор?
5. Как определить время опорожнения призматического резервуара через отверстие в его дне?

Содержание

Лабораторная работа 1 – Основные физические свойства жидкости	5
Лабораторная работа 2 – Приборы и методы измерения гидростатического давления	14
Лабораторная работа 3 – Определение силы гидростатического давления на плоскую поверхность	20
Лабораторная работа 4 – Определение силы гидростатического давления на цилиндрическую поверхность	24
Лабораторная работа 5 – Методы определения расхода жидкости	29
Лабораторная работа 6 – Исследование уравнения Бернулли	33
Лабораторная работа 7 – Исследование режимов движения жидкости	40
Лабораторная работа 8 – Изучение коэффициента гидравлического сопротивления	44
Лабораторная работа 9 – Определение потерь напора в местных сопротивлениях	49
Лабораторная работа 10 – Определение расхода жидкости при истечении через насадки в атмосферу при постоянном напоре	55
Лабораторная работа 11 - Определение расхода жидкости при истечении через насадки в атмосферу при переменном напоре	59

Учебное издание

Спиридонов Владимир Константинович
Паршикова Людмила Александровна
Случевский Александр Михайлович

ГИДРАВЛИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Редактор Лебедева Е.М.

Подписано к печати 28.08.2013 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага печатная. Усл. п. л. 3,72. Тираж 100 экз. Изд. № 2386.

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии.
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА