

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
"ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРГЦИИ И
МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА"**

**Ибрагимова Зайтуна Искандаровна
Абдураимова Дилбар Айбековна
Хошимов Сардор Нейматжон угли**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по курсу «Гидравлика и
гидравлические системы»**

Ташкент - 2022

Учебное пособие составлено в соответствии с программами предмета по курсу «Гидравлика и гидравлические системы» для направлений бакалавриата 60810100 – Сельскохозяйственная механизация, 60812400 – “Механизация водохозяйственных и мелиоративных работ”, 60810300 – “Техническая служба в сельском и водном хозяйстве” и 60810400 – “Применение инновационных методов и технологий в сельском хозяйстве”

Для обеспечения успешного овладения студентами необходимыми знаниями, умениями и навыками настоящий практикум предоставляет необходимые теоретические сведения и предусматривает возможность самостоятельного проведения лабораторных исследований.

The manual was compiled in accordance with the subject programs for the course "Hydraulics and Hydraulic Systems" for the Bachelor's degree programs 60810100 - Agricultural mechanization, 60812400 - "Mechanization of water management and land reclamation works", 60810300 - "Technical service in agriculture and water management" and 60810400 - “Application of innovative methods and technologies in agriculture”

To ensure successful mastery of the necessary knowledge, skills and abilities by students, this workshop provides the necessary theoretical information and provides for the possibility of conducting independent laboratory research.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Э.Т.Фармонов, д.т.н., профессор кафедры
"Эксплуатация и ремонт машин", НИУ
"ТИИИМСХ"

А.Х.Алиазаров, д.т.н., профессор кафедры
"Строительства и монтажа инженерных
коммуникаций" , Наманганский инженерно-
строительный институт

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практикум предназначен для подготовки и проведения студентами лабораторных работ как пособие по курсу «Гидравлика и гидравлические машины».

Подготовка к выполнению лабораторной работы включает самостоятельное ознакомление студентов с описанием очередной работы и составление им ответов на контрольные вопросы по теоретической части курса. Каждая расчетно-экспериментальная работа состоит из гидравлического расчета исследуемой величины, проведения эксперимента, обработка опытных данных и оформления работы, завершающегося краткими выводами по результатам опытов и сопоставлению их с расчетом.

При разработке различных научных положений из области механики жидкости часто приходится проводить опыты на тех или других гидравлических модулях в лабораторных условиях. Выполнение такого рода экспериментальных работ требует знания: основ теории моделирования, в которой освещаются вопросы о том, какой формы и каких размеров должна создаваться модель, какой величины расход воды следует задавать для этой модели при определенном ее масштабе и т.п.; основ техники моделирования, т.е. различных практических приемов проведения опытов; существующей измерительной аппаратуры, служащей для определения в лабораторных условиях различных величин (давлений, скоростей движения воды и т.п.); анализ погрешностей измерения, а также принятых методов обработки полученного экспериментального материала.

Содержание практикума включает основные разделы гидравлики – «Гидростатика» и «Гидродинамика», а также прикладной раздел, в котором рассматриваются гидравлические машины, используемые в сельскохозяйственном производстве.

Методика и порядок проведения лабораторных работ описаны в практикуме с расчетом на выполнение студентами полного объема работы самостоятельно.

При составлении практикума предусматривалось, возможно, большая простота изложения материала, чтобы книга могла служить пособием также для читателей, самостоятельно изучающих курс «Гидравлика и гидравлические машины». Практикум составлен в соответствии с программой курса «Гидравлика и гидравлические системы» для бакалавров, отдельными разделами пособия могут пользоваться магистранты и докторанты данного направления.

При составлении пособия авторы следовали методическим разработкам ученых внесшим значительный вклад в развитие лабораторной и учебно-методической базы кафедры К.Ш. Латипова, Р.М.Каримова.

Авторы также выражают благодарность коллективу кафедры «Гидравлика и гидроинформатики» за ценные рекомендации по его совершенствованию.

Практикум составлен в соответствии с программой курса «Гидравлика и гидравлические системы» для бакалавров, отдельными разделами пособия могут пользоваться магистранты и докторанты данной отрасли.

ВВЕДЕНИЕ

Гидравликой называется прикладной раздел механики, изучающий законы равновесия и движения жидкостей применительно к решению технических задач. Решаемые, гидравликой задачи касаются главным образом потоков жидкости, ограниченных твердыми стенками, т. е. потоков в трубах, каналах, элементах различных машин и устройств.

Аналитический метод решения гидравлических задач, заключающийся в составлении и интегрировании дифференциальных уравнений движения жидкости, применим лишь для простейших потоков. В большинстве практически важных случаев характер движения жидкостей оказывается настолько сложным, что составить уравнения, точно описывающие движение, не представляется возможным. Обычно в таких случаях в реальное движение вносят упрощения (например, предполагают, что между движущимися частицами жидкости отсутствуют силы трения) и уравнения движения составляют и интегрируют для выбранной упрощенной модели. Если полученные уравнения не могут быть точно проинтегрированы, то их интегрируют численно, или, если позволяет физическое содержание задачи, упрощают (например, линеаризуют), приводя к интегрируемому типу.

Погрешности, вносимые в решение задачи перечисленными упрощениями, могут быть оценены только опытным путем. На основании опытных данных в решения вносят поправки, делающие эти решения пригодными для надежных технических расчетов. Таким образом, эксперимент является неотъемлемой частью большинства гидравлических исследований и экспериментальные результаты широко используют в гидравлических расчетах.

Эксперимент приобретает особо важное значение при рассмотрении задач, связанных с такими движениями жидкости, которые не поддаются теоретической схематизации, например, с потоками в некоторых местных сопротивлениях. Сказанное относится и к гидравлическим машинам. Вследствие большой сложности процессов движения жидкости в каналах таких машин их точный аналитический расчет в настоящее время невозможен.

Проектирование гидравлических машин базируется в значительной мере на результатах экспериментов.

Таким образом, наиболее продуктивным методом гидравлических исследований является комбинированный метод, представляющий собой целесообразное сочетание теории с экспериментом. Научной основой гидравлического эксперимента служит теория моделирования, базирующаяся на законах гидродинамического подобия.

Следует отметить, что в некоторых случаях механическое движение жидкостей сопровождается сложными физическими процессами (например, при кавитации, гидроударе и др.), которые могут оказывать обратное влияние на характер рассматриваемого движения и должны учитываться при решении задач гидравлики.

Объектом изучения в гидравлике являются жидкости — материальные тела, занимающие по своему молекулярному строению промежуточное положение между твердыми телами и газами. Между молекулами жидкостей действуют значительные силы, удерживающие молекулы на близких расстояниях, благодаря чему жидкости, как и твердые тела, обнаруживают большое сопротивление уменьшению своего объема, т. е. имеют малую сжимаемость. Молекулярное движение в жидкостях представляет собой сочетание колебательного движения каждой молекулы около некоторого стационарного положения и сменяющего его время от времени скачкообразного перемещения молекул в новые положения, благодаря чему в жидкостях, как и в газах, происходит само диффузия молекул. Жидкости, как и газы, обладают свойством текучести. Текучесть выражается в том, что приложенная к жидкости сдвигающая сила приводит к преимущественной направленности скачкообразных перемещений молекул, что вызывает движение жидкости в направлении действия силы. Деформация жидкого объема, вызванная постоянной сдвигающей силой, непрерывно возрастает так, что даже весьма малые силы могут вызвать весьма большие деформации.

В гидравлике жидкость рассматривается как сплошная среда (континуум), т. е. среда, масса которой распределена по объему непрерывно.

Основной механической характеристикой жидкости является плотность ρ , определяемая для однородной жидкости отношением ее массы M к занимаемому объему W

$$\rho = \frac{M}{W}$$

Для неоднородной жидкости плотность в некоторой лючке A объема определяется соотношением

$$\rho_A = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta W}, \quad (1)$$

где ΔM — масса жидкости в объеме ΔW ;

ΔW — элементарный объем, содержащий точку A .

Масса жидкости, предоставленная действию только молекулярных сил, всегда принимает форму шара. Взаимодействие между молекулами, составляющими сферическую граничную поверхность, и внутренними молекулами жидкости сводится к сжимающей силе, распределенной по поверхности. Напряженность этой силы называется дополнительным давлением ρ_d . Благодаря действию дополнительного давления граничная поверхность жидкости сопротивляется растяжению. Сила сопротивления называется силой поверхностного натяжения s ; она направлена по касательной к поверхности и пропорциональна длине линии разрыва l :

$$s = \sigma l$$

где σ — поверхностное натяжение.

Дополнительное давление ρ_d связано с поверхностным натяжением σ соотношением

$$\rho_d = \frac{2\sigma}{r},$$

где r — радиус сферической поверхности жидкости.

Внешние силы, действующие на жидкость, разделяются на массовые и поверхностные. Массовая сила \bar{Q} распределена по массе жидкости. Массовая

сила, приходящаяся на единицу массы, называется единичной массовой силой \bar{q} и в общем случае определяется соотношением

$$\bar{q}_A = \lim_{\Delta M \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{Q}}{\Delta M} \quad (3)$$

где ΔM —масса в объеме ΔW , содержащем точку А; $\Delta \bar{Q}$ — массовая сила, приложенная к массе ΔM .

К массовым силам, действующим на жидкость в неинерциальных системах отсчета, относятся сила тяжести $\overline{\Delta G}$, переносные силы инерции $\overline{\Delta J}$ кориолисовы силы инерции $\overline{\Delta J}_K$ (рис. 1):

$$\overline{\Delta Q} = \overline{\Delta G} + \overline{\Delta J} + \overline{\Delta J}_K \quad . \quad (4)$$

Жидкость, находящаяся в покое под действием массовых сил, не сохраняет сферическую форму и принимает форму содержащего ее сосуда, образуя на границе с внешней средой поверхность, которая называется свободной, если внешней средой является газ, и поверхностью раздела, если внешней средой служит другая жидкость.

Внешние поверхностные силы непрерывно распределены по граничной поверхности жидкости. Они могут быть нормальными к поверхности силами давления \bar{P} и касательными к поверхности — силами трения \bar{T} (рис. 2).

Напряженность нормальный сил называется давлением \bar{p} . Давление в точке А граничной поверхности

$$\bar{p}_A = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{P}}{\Delta F}, \quad (5)$$

Где ΔF — площадка, выбранная на граничной поверхности и содержащая точку А;

$\Delta \bar{P}$ — нормальная сила, действующая на площадку ΔF .

Напряженность касательных сил называется касательным напряжением или напряжением трения \bar{t} . Касательное напряжение в точке граничной поверхности

$$\bar{t}_A = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta F}, \quad (6)$$

где $\Delta \bar{T}$ —касательная сила, действующая на площадку ΔF .

Общие сведения о физических свойствах жидкостей

Жидкости отличаются рядом свойств, которые могут существенно влиять на закономерности их равновесия и движения.

Свойства жидкостей зависят от особенностей молекулярного строения. Некоторые свойства могут быть изучены и без проникновения в детали молекулярного строения. Для этого оказывается возможным воспользоваться средними для массы жидкости характеристиками молекулярного движения, например характеристиками, определяющими среднюю кинетическую энергию молекул. Такими характеристиками являются термодинамические параметры состояния — температура и давление.

Испарение представляет собой процесс перехода жидкости в газообразное состояние. Этот процесс обусловлен прорывом молекул жидкости сквозь свободную поверхность и распространением их в окружающем пространстве. Если объем этого пространства достаточно велик, испарение продолжается до исчезновения жидкости, хотя часть испарившихся молекул возвращается в жидкость — конденсируется. Если объем недостаточно велик, испарение продолжается до наступления динамического равновесия, когда число испаряющихся и число конденсирующихся за некоторое время молекул выравниваются. При этом в окружающем пространстве устанавливается давление, называемое давлением насыщенного пара $p_{н. п}$ или упругостью насыщенного пара. Величина этого давления зависит от температуры.

Растворение газов в жидкостях представляет собой процесс проникновения молекул газа из окружающей среды через свободную поверхность внутрь жидкости.

Количество растворенных в жидкости газов может увеличиваться с течением времени несмотря на то, что часть молекул газа из жидкости возвращается в окружающую среду. Процесс растворения продолжается до насыщения жидкости газом, т. е. до такого состояния, при котором количество растворяющегося и количество выделяющегося за некоторое время газа оказываются равными.

Объем газа, который может раствориться при данной температуре в данном объеме жидкости до ее насыщения, пропорционален давлению на свободной поверхности жидкости (закон Генри):

$$W_{\text{го}} = kW_{\text{ж}} \frac{p}{p_0} \quad (7)$$

где $W_{\text{го}}$ — объем растворенного при давлении p газа, отнесенный для сопоставления объемов к эталонному давлению p_0 ; k — коэффициент растворимости;

$W_{\text{ж}}$ — объем жидкости; p — давление на свободной поверхности.

Величина коэффициента растворимости зависит от химического состава жидкости и газа и их температуры.

Время насыщения жидкости газом зависит от площади и состояния свободной поверхности. Возмущения поверхности ускоряют процесс растворения газа.

При понижении давления на поверхности жидкости газ выделяется до тех пор, пока его объем в жидкости не придет в соответствие с новой величиной давления. Выделяется газ интенсивнее, чем растворяется. При выделении газа жидкость вспенивается.

Кипение — процесс образования и роста пузырьков пара внутри жидкости с последующим прорывом этих пузырьков сквозь свободную поверхность в окружающую среду.

При рассмотрении процесса кипения следует иметь в виду, что технические жидкости всегда содержат пузырьки нерастворенных газов. Поверхности этих пузырьков представляют собой свободную поверхность, через которую внутрь пузырьков испаряется жидкость до состояния насыщения. Давление внутри пузырька практически равно давлению насыщенного пара.

Если внешнее давление превышает давление насыщенного пара, размер пузырька уменьшается, действующая на него подъемная сила со стороны жидкости также уменьшается и оказывается недостаточной для преодоления сопротивления среды и выталкивания пузырька из жидкости.

Если же давление на поверхности жидкости меньше давления насыщенного пара, внешнее давление на пузырек оказывается меньше внутреннего; пузырек увеличивается, всплывает к поверхности и прорывается сквозь нее в окружающую среду. Происходит кипение жидкости.

Поскольку давление насыщенного пара зависит от температуры, жидкость может кипеть при любом давлении, если ее температура достигнет величины, при которой данное давление является давлением насыщенного пара. Эта температура называется температурой кипения. Со свойством кипения связана прочность жидкости на разрыв. Технические жидкости не выдерживают растягивающих усилий, так как при сжимающем усилии, равном давлению насыщенного пара, в них уже возникают разрывы.

Тепловое расширение—способность жидкостей изменять объем при изменении температуры—характеризуется коэффициентом теплового расширения β_t , равным относительному изменению объема W при изменении температуры t на один градус при постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{W} \cdot \frac{\partial W}{\partial t}. \quad (8)$$

Коэффициент β_t зависит для данной жидкости от температуры и давления. Пользуясь соотношением (8), можно определить изменение объема при изменении температуры:

$$W = W_0 e^{\int_{t_0}^t \beta_t dt}.$$

Пользуясь средним в данном диапазоне температур значением коэффициента теплового расширения, эту формулу можно упростить:

$$W \approx W_0 [1 + \beta_t(t - t_0)].$$

Из последнего выражения следует, что плотность

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta_t(t - t_0)}.$$

В некоторых случаях ввиду малости коэффициента теплового расширения изменением плотности жидкости с изменением температуры можно пренебречь.

Сжимаемость — способность жидкостей уменьшать объем при увеличении давления — характеризуется коэффициентом сжимаемости β_p , который равен относительному изменению объема W при изменении давления p на единицу:

$$\beta_p = -\frac{1}{W} \cdot \frac{\partial W}{\partial p} \quad (9)$$

Процесс изменения объема W жидкости под влиянием давления может происходить в различных условиях: изотермически при $t=const$ и адиабатически. Сжатие жидкости можно принять изотермическим, если процесс происходит медленно и выделяющееся тепло успевает рассеиваться. При быстротекающем сжатии процесс нужно считать адиабатическим. В соответствии с этим различают изотермический и адиабатический коэффициенты сжимаемости. Величины этих коэффициентов зависят от температуры и давления.

Величины, обратные коэффициентам сжимаемости, называют соответственно изотермическим и адиабатическим модулями упругости:

$$K = \frac{1}{\beta_p} \quad (10)$$

Пользуясь соотношениями (9) и (10), можно определить изменение объема жидкости при изменении давления:

$$W = W_0 e^{\int_{p_0}^p \frac{dp}{K}}$$

При работе гидравлических систем и агрегатов в условиях незначительных изменений температуры и давления коэффициенты сжимаемости можно считать постоянными и определять изменение объема при изменении давления по приближенной формуле:

$$W \approx W_0 \left[1 - \frac{p - p_0}{K} \right].$$

Из последнего выражения следует, что плотность

$$\rho \approx \frac{\rho_0}{1 - \frac{p - p_0}{K}}$$

Модули упругости большинства жидкостей настолько велики, что жидкости можно считать практически несжимаемыми.

Вязкость — свойство жидкостей оказывать сопротивление относительному смещению слоев, вызывающему деформацию сдвига.

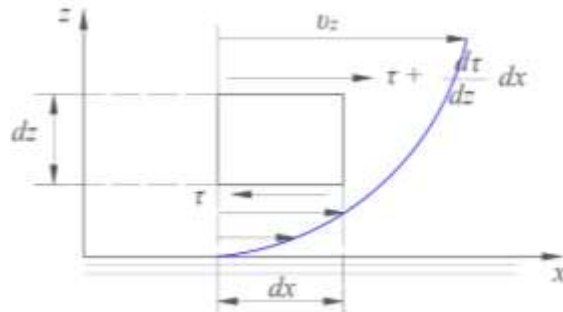


Рис.3. К закону внутреннего трения в жидкостях

Сила сопротивления сдвигу называется силой внутреннего трения. При прямолинейном слоистом движении жидкости (рис. 3) сила внутреннего трения между смещающимися один относительно другого слоями выражается формулой Ньютона:

$$T = \pm \mu F \frac{d\theta}{dy} \quad (11)$$

где μ — динамическая вязкость жидкости;

F - площадь трущихся слоев;

$\frac{d\theta}{dy}$ — поперечный градиент скорости, выражающий скорость угловой деформации при сдвиге. Знак « \pm » выбирается в зависимости от знака градиента скорости так, чтобы сила T была положительной.

Касательные напряжения между слоями жидкости определяются соотношением

$$\tau = \frac{T}{F} = \pm \mu \frac{d\theta}{dy}. \quad (12)$$

Закон, связывающий касательное напряжение со скоростью деформации, может быть отличным от закона Ньютона. В этом случае жидкости называются неньютоновскими.

В гидравлических расчетах удобно пользоваться кинематической вязкостью

$$\nu = \mu/\rho. \quad (13)$$

Динамическая и кинематическая вязкости зависят от температуры и давления: с возрастанием температуры вязкость уменьшается, с повышением давления увеличивается. Зависимость вязкости от давления существенна только при больших перепадах давления.

I. ГИДРОСТАТИКА

1. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

1.1 Цель работы

Измерения гидростатического давления различными приборами Изучение принципа работы и конструкций простейших жидкостных приборов для измерения давлений. Развитие навыков измерений и расчетов манометрического и вакуумметрического давлений.

1.2 Общие сведения

Манометрическим или избыточным давлением P_m Па, называется превышение давления над атмосферным

$$P_m = P - P_a, \quad (1.1)$$

где P - абсолютное (полное) давление, Па;

P_a -атмосферное давление, Па.

Вакуумметрическим давлением P_v , Па, называется недостаток давления до атмосферного

$$P_v = P_a - P \quad (1.2)$$

Значение манометрических P_m и вакуумметрических P_v давлений при измерении их жидкостными мановакуумметрами или вакуумметрами определяются по формулам

$$P_m = \rho \cdot g \cdot h_m, \quad (1.3)$$

$$P_v = \rho \cdot g \cdot h_e, \quad (1.4)$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м³, (см. Приложение А);

g - ускорение свободного падения, м²/с;

h_m - разность уровней жидкости в коленах мановакуумметра при измерении манометрического давления, м;

h_e - разность уровней жидкости в коленах мановакуумметра при измерении вакуумметрического давления, м.

Абсолютное (полное) давление P , Па равно сумме атмосферного и манометрического давлений,

$$P = P_a + \rho \cdot g \cdot h_m \quad (1.5)$$

или разности атмосферного и вакуумметрического давлений

$$P = P_a - \rho \cdot g \cdot h_e \quad (1.6)$$

1.3 Опытная установка

Установка для демонстрации и измерения давлений (см. рисунок 1.1) состоит из резервуара 1, соединенного при помощи резиновой трубки 2 с открытым резервуаром 3, перемещающимся в вертикальном направлении. Резервуары заполнены водой и представляют собой два сообщающихся сосуда.

Измерительная часть установки состоит из U-образных мановакуумметров 4, 5, 6, соответственно заполняемых водой, жидкостью с плотностью меньше, чем у воды и жидкостью с плотностью больше, чем у воды, а также вакуумметра 7. Мановакуумметры и вакуумметр соединены с воздушной областью резервуара 1, где измеряется давление. Нижний конец трубки вакуумметра 7 опущен в открытый резервуар в водой 8. Краны 9 и 10 служат соответственно для соединения резервуара 1 с атмосферой и вакуумметром 7.

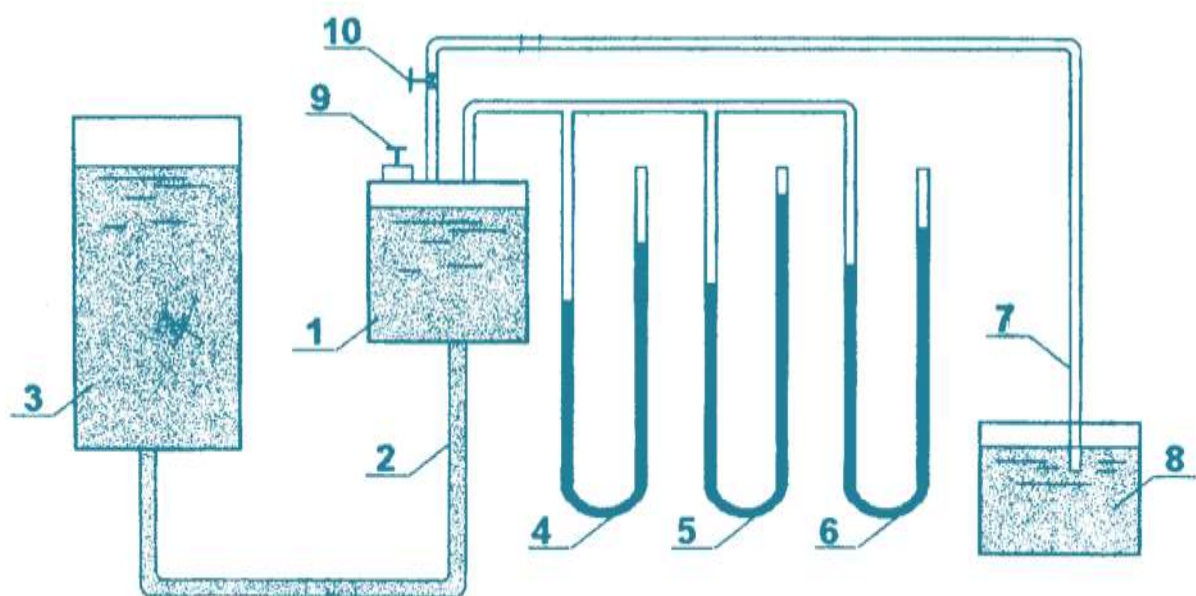


Рис.1.1. Схема опытной установки: 1; 3 – резервуары; 4, 5, 6 - моновакуумметры; 7 – вакуумметр.

1.4 Порядок проведения опытов

1.4.1 Измерение манометрического давления

Открываются краны 9, 10. Резервуар 3 поднимается вверх на 0,2-0,3 м. После установления уровней воды в резервуарах 1 и 3 снимаются показания мановакуумметров 4, 5, 6 и заносятся в таблицу 1.1 для условий первого опыта.

Таблица 1.1.

Результаты измерений и расчета манометрического давления

№ опыта	Измеренные величины			Расчетные величины		
	Показания мановакуумметров, м			Манометрическое давление, Па		
	h_{m_1}	h_{m_2}	h_{m_3}	P_{m_1}	P_{m_2}	P_{m_3}
1.						
2.						

Условные обозначения в таблице 1.1:

h_{m_1} , h_{m_2} , h_{m_3} - разность уровней жидкостей, соответственно в мановакуумметрах 4, 5, 6;

P_{m_1} , P_{m_2} , P_{m_3} - манометрическое давление, определенное по показаниям, соответственно мановакуумметров 4, 5, 6.

Резервуар 3 поднимается вверх на 0,2-0,3 м. После установления уровней воды в резервуарах 1 и 3 снимаются показания мановакуумметров 4,5,6 и заносятся в таблицу 1.1 для условий второго опыта.

Резервуар 3 поднимается в близкое к крайнему верхнему положение. После установления уровней воды в резервуарах 1 и 3 снимаются показания вакуумметров 4,5,6 и заносятся в табл. 1.1 для условий третьего опыта.

1.4.2 Измерение вакуумметрического давление

Открываются краны 9 и 10. Резервуар 3 устанавливается в крайнем верхнем положении.

После установления уровней воды в резервуарах 1 и 3 кран 9 закрывается. Резервуар 3 опускается вниз на 0,2-0,3 м. Снимаются показания мановакуумметров 4,5,6 и вакуумметра 7 и заносятся в таблицу 1.2 для условий первого опыта.

Резервуар 3 опускается вниз на 0,2-0,3 м. После установления уровней воды резервуарах 1 и 3 снимаются показания мановакуумметров 4,5,6 и вакуумметра 7 и заносятся в таблицу 1.2 для условий второго опыта.

Таблица 1.2.

Результаты измерений и расчета вакуумметрического давления

№ опыта	Измеренные величины				Расчетные величины			
	Показания мановакуумметров и вакуумметра м				Вакуумметрическое давление, Па			
	h_{ϵ_1}	h_{ϵ_2}	h_{ϵ_3}	h_{ϵ_4}	P_{ϵ_1}	P_{ϵ_2}	P_{ϵ_3}	P_{ϵ_4}
1.								
2.								
3.								

Условные обозначения в таблице 1.2:

$h_{\epsilon_1}, h_{\epsilon_2}, h_{\epsilon_3}, h_{\epsilon_4}$ - разность уровней жидкостей, соответственно в мановакуумметрах 4,5,6 и высота подъема жидкости в вакуумметре 7;

$P_{\epsilon_1}, P_{\epsilon_2}, P_{\epsilon_3}, P_{\epsilon_4}$ - вакуумметрическое давление, определенное по показаниям соответственно мановакуумметров 4,5,6 и вакуумметра 7.

Резервуар 3 опускается в крайнее нижнее положение. После установления уровней воды в резервуарах 1 и 3 снимаются показания мановакуумметров 4,5,6 и вакуумметра 7 и заносятся в таблицу 1.2 для условий третьего опыта.

1.5. Обработка опытных данных

Расчетные значения манометрического давления в резервуаре определяются по формуле (1.3) и заносятся в таблицу 1.1.

Расчетные значения вакуумметрического давления в резервуаре определяются по формуле (1.4) и заносятся в таблицу 1.2.

Расчетные значения абсолютного давления в резервуаре определяются по формулам (1.5) и заносятся в таблицу 1.3.

Значения плотности жидкостей в мановакуумметрах принимаются по Приложению А.

Таблица 1.3.

Результаты расчета абсолютного давления

№ опыта	Абсолютного давление, Па (при $P > P_a$)				Абсолютного давление, Па (при $P < P_a$)			
	P_{e1}	P_{e2}	P_{e3}		P_{e1}	P_{e2}	P_{e3}	P_{e4}
1.								
2.								
3.								

Условные обозначения в таблице 1.3:

P_{e1} , P_{e2} , P_{e3} , P_{e4} - абсолютное давление, определенное по показателям, соответственно мановакуумметров 4,5,6 и вакуумметра 7.

1.6. Вопросы к защите лабораторной работы

1. Какие два свойства гидростатического давления в точке ?
2. В каком виде записывается уравнение , выражающее закон гидростатического давления в точке ?
3. Что называют манометрическим , вакуумметрическим , абсолютным давлением ? Запишите соответствующие соотношения .
4. Что называют пьезометрическим напором?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ

2.1 Цель работы

Определение формы свободной поверхности жидкости в цилиндрическом сосуде, вращающемся относительно вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. Сравнение опытных данных с теоретическими полученными в результате решение уравнений Эйлера.

2.2 Общие сведения

При вращении цилиндрического сосуда с жидкостью вокруг его вертикальной оси с постоянной угловой скоростью возникают дополнительные центробежные силы инерции.

В результате совместного действия массовых (тяжести, инерции) и поверхностных (трения поверхностного натяжения) сил происходит деформация свободной поверхности жидкости при сохранении ее неизменного объема.

Ограничиваясь рассмотрением только основных действующих массовых сил в уравнениях Эйлера, получим для свободной поверхности жидкости (поверхности равного давления) уравнение параболоида вращения

$$Z_T = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g}, \quad (2.1)$$

где Z_T - вертикальная координата точки свободной поверхности, м;

ω - угловая скорость вращения, с^{-1} ;

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (2.2)$$

n – частота вращения сосуда, об/мин;

r – горизонтальная координата точки свободной поверхности (радиус вращения), м;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Так как параболоид вращения является телом с центральной симметрией, то координаты его точек в любом диаметрально противоположном направлении одинаковы.

2.3 Опытная установка

Установка (см. рисунок 2.1) состоит из электродвигателя с выключателем 1, червячного редуктора 2 и сосуда 3 с жидкостью.

Измерительная часть установки включает устройство для измерения координат кривой свободной поверхности, состоящее из горизонтальной рейки 4 с кареткой 5 и измерительной иглы 6; стрелочный указатель частоты вращения сосуда 7.

2.4 Порядок проведения опытов

Перед началом опыта проверяется заполнение сосуда жидкостью примерно на 0,5...0,6 высоты сосуда.

Включается электродвигатель 1, с помощью стрелочного указателя 7 устанавливается частота вращения сосуда с жидкостью в пределах 100...150 об/мин.

При установленной частоте вращения мерной иглой 6 измеряется вертикальная координата точки свободной поверхности жидкости на оси вращения ($r = 0$).

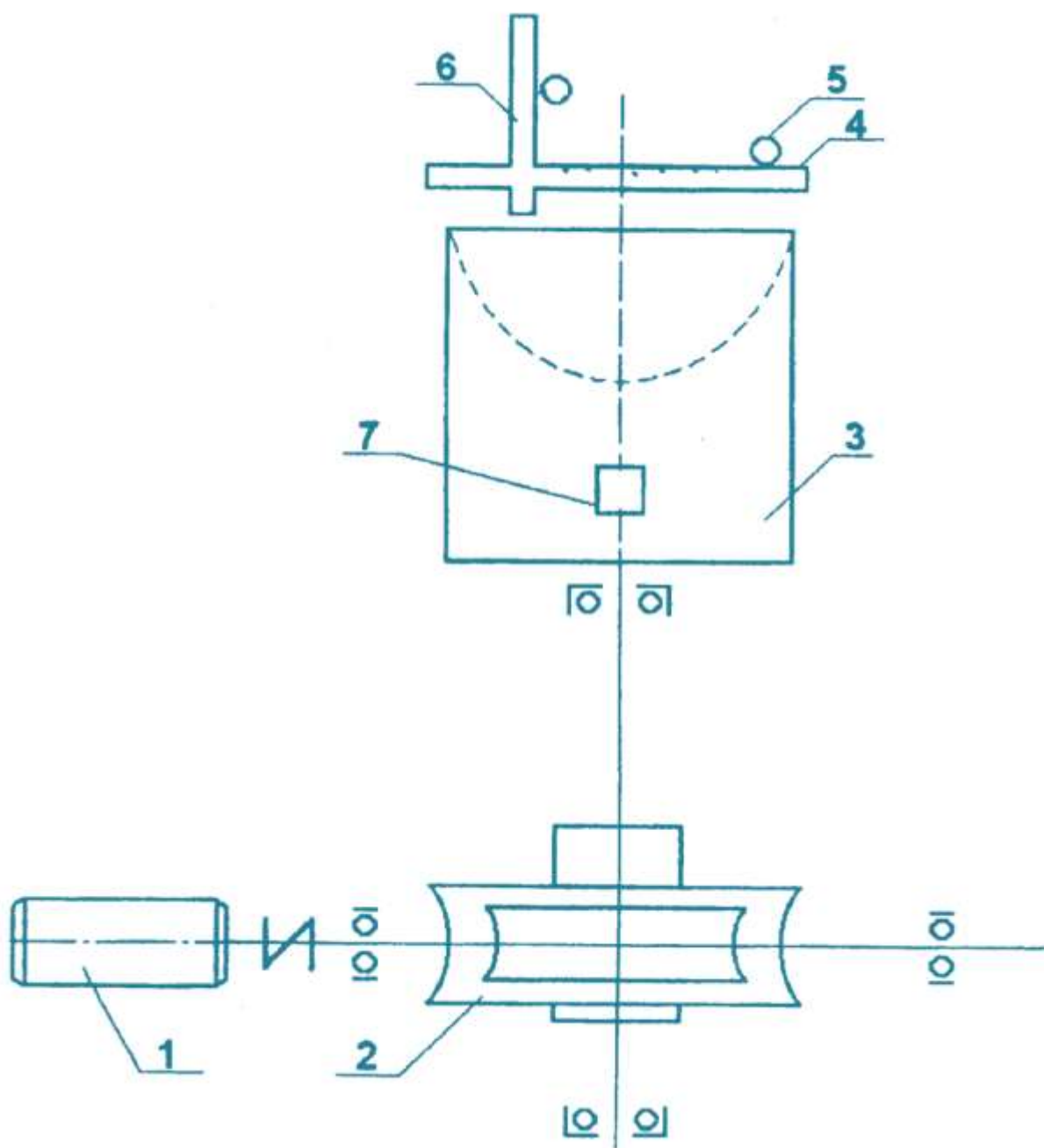


Рис.2 Схема опытной установки: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – сосуд с жидкостью; 4, 5 – линейка с кареткой.

Подняв мерную иглу вверх и перемещая ее в выбранном горизонтальном направлении через 1 см измеряются вертикальные координаты нескольких точек свободной поверхности жидкости, в т.ч. у стенки сосуда.

Результаты измерений характеристик заносятся в таблицу 2.1.

2.5 Обработка опытных данных

Вертикальные координаты точек свободной поверхности жидкости относительно начала координат, помещенного в наинизшей точке параболоида вращения, определяются по формуле

$$Z_{oni} = Z_0 - Z_i, \quad (2.3)$$

где Z_0 - вертикальная координата наинизшей точки параболоида вращения.

Таблица 2.1.

Результаты измерений и расчетов

№ точки	Измеренные величины			Расчетные величины			
	n об/мин	r , см	Z_i , см	Z_{oni} , см	ω , c^{-1}	Z_{Ti} , см	$\frac{\Delta z}{z_{oni}}$, %
0							
1							
⋮							
i							

По формуле (2.2) определяется угловая скорость вращения сосуда с жидкостью.

По формуле (2.1) определяются расчетные (теоретические) значения вертикальных координат свободной поверхности жидкости во вращающемся сосуде при значениях радиуса вращения, указанных в таблице 2.1.

Расхождение между опытными и расчетными значениями координат свободной поверхности определяется по формуле

$$\frac{\Delta Z}{Z_{oni}}, \% = \frac{Z_{oni} - Z_{Ti}}{Z_{oni}} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

Результаты расчетов заносятся в таблицу 2.1.

По опытными данным в системе координат Z, r строится кривая свободной поверхности жидкости. Выполняются анализ результатов исследования и выводы в целом по работе.

2.6 Вопросы к защите лабораторной работы .

1. Что называют относительным покоем жидкости ?
2. Запишите и расшифруйте уравнение поверхности равного давления для случая вращения жидкости с цилиндрическим сосудом при постоянной частоте вращения ($\omega = cont$).

II. ГИДРОДИНАМИКА

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

3.1 Цель работы

На трубопроводе переменного сечения опытным путем проследить изменение различных составляющих полного напора жидкости. Построение по результатам измерений линии полного напора (напорной линии) и пьезометрической линии.

3.2 Общие сведения

Уравнение Бернулли представляет собой аналитически выраженный закон сохранения энергии жидкости и устанавливает связь между скоростью течения, высотой положения центра живого сечения и давлением в различных сечениях потока.

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

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{a_1 \cdot Q_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{a_2 \cdot Q_2^2}{2g} + \Sigma h, \quad (3.1)$$

где:

Z – геометрическая высота или геометрический напор (расстояние от плоскости сравнения до центра живого сечения), м.

Геометрический напор выражает величину удельной потенциальной энергии положения;

$\frac{P}{\rho g}$ - пьезометрическая высота или пьезометрический напор, м.

(P – давление жидкости в сечении потока, Па; ρ -плотность жидкости, ускорение свободного падения, m/c^2).

Пьезометрический напор выражает величину удельной потенциальной энергии давления, а сумма геометрического и пьезометрического напоров определяет величину удельной потенциальной гидравлической энергии;

$\frac{\alpha \mathcal{V}^2}{2g}$ - скоростная высота или скоростной напор, м. (α -коэффициент

неравномерности распределения скоростей течения по живому сечению потока, \mathcal{V} -средняя скорость потока в сечении, м/с). Скоростной напор выражает величину удельной кинетической энергии;

Σh - потери полного напора жидкости между сечениями, м. Потери полного напора выражают затраты удельной гидравлической энергии на преодоление сопротивлений на участке трубопровода между сечениями.

Сумма геометрического, пьезометрического и скоростного напоров называется полным напором жидкости в данном сечении. Полный напор H выражает величину удельной гидравлической энергии в сечении

$$H = Z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{a \cdot \mathcal{V}^2}{2g} \quad (3.2)$$

Очевидно, что потери полного напора жидкости между сечениями равны

$$\Sigma h = H_1 - H_2 \quad (3.3)$$

Для количественной оценки изменения величины отдельных членов уравнения Бернулли по длине трубопровода используются понятия:

- пьезометрического уклона i_n

$$i_n = \frac{\left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} \right)}{L} \quad (3.4)$$

где L - длина трубопровода между сечениями, м;

i_n - гидравлический уклон

$$i_n = \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{\Sigma h}{L} \quad (3.5)$$

Графики изменения пьезометрического и полного напоров по длине трубопровода называются соответственно линиями пьезометрического и полного напоров.

3.3 Опытная установка

Горизонтально расположенный трубопровод состоит из трех последовательно соединенных между собой труб различного сечения (см. рисунок 3). Вода из напорного резервуара 1 поступает в трубопровод 2 при открытии вентиля 3. Подача воды в напорный резервуар 1 осуществляется открытием вентиля 4. Из трубопровода 1 вода поступает в сливной резервуар 5 или в мерный резервуар 6 с помощью переливного устройства.

Измерительная часть установки включает секундомер, мерный резервуар 6, трубки полного напора 7 и пьезометров 8. Трубки полного напора и пьезометры присоединены к трубопроводу 2 в соответствующих сечениях и установлен на общем щите с измерительными шкалами.

3.4. Порядок проведения опытов

Открывается вентиль 4, напорный резервуар 1 заполняется водой.

После заполнения напорного резервуара 1 водой открывается вентиль 3 и в трубопроводе устанавливается некоторый постоянный расход воды. Снимаются показания трубки полного напора 7 и пьезометров 8. Измеряется расстояние между сечениями, где установлены пьезометры.

Объемным способом находится расход воды в трубопроводе 1. Для этого с помощью секундомера определяют время наполнения мерного резервуара 6.

Результаты всех измерений заносятся в таблицу 3.1.

3.5 Обработка опытных данных

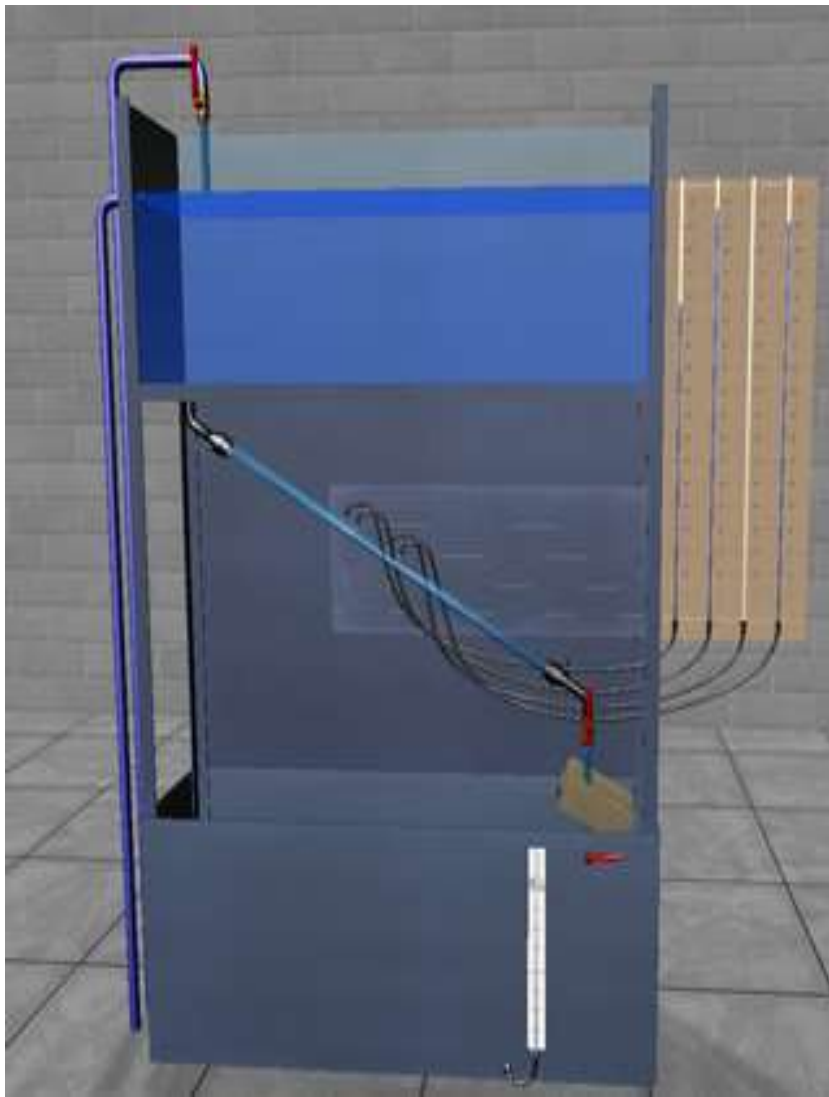
Определяется скоростной напор в центре каждого сечения в предположении $\alpha \cong 1$.

$$h = \frac{g^2}{2g} = H - \frac{P}{\rho \cdot g}, \quad (3.6)$$

где h - разность показаний трубки полного напора и пьезометра.

Определяется скорость потока в центре каждого сечения

$$g = \sqrt{2g \cdot h} \quad (3.7)$$



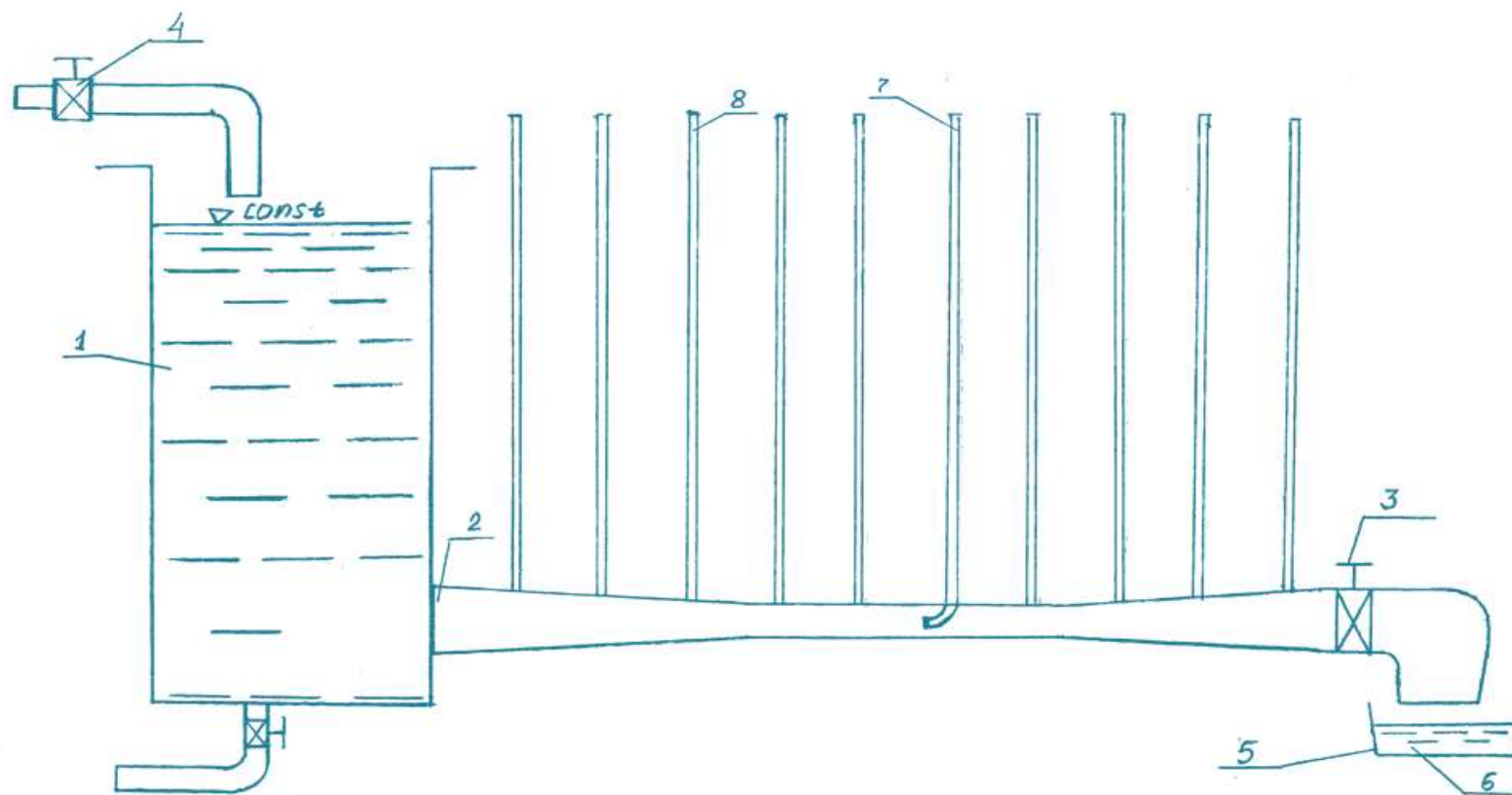


Рис.3. Схема опытной установки: 1 – резервуар; 2 – трубопровод переменного сечения; 3 – вентиль;
7 – трубки Пито; 8 – пьезометры.

Вычисляется средняя скорость по живому сечению потока

$$g_c = 0,8 \cdot g \quad (3.8)$$

Таблица 3.1.
Результаты измерений и обработки опытных данных

Пьезо метры	Измеренные ве- личины				Расчетные величины					Пьезометрические и напорные линии	
	$h_i,$ см	$\frac{P}{\gamma},$ см	$W,$ см ³	$t,$ с	$Q,$ см ³ /с	$\omega,$ см ²	$g,$ см/с	$\frac{\alpha g^2}{2g},$ см	$\frac{P + \alpha g^2}{\gamma + 2g},$ см	$H_P = Z + \frac{P}{\gamma},$ см	$H_E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha g^2}{2g},$ см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
2											
3											
4											
5											
5 ^a											
6											
7											
8											
9											

Определяется расход воды в каждом сечении трубопровода по уравне-
нию сохранения расхода воды

$$Q_m = \omega_1 \cdot g_{c1} = \omega_2 \cdot g_{c2} = \omega_3 \cdot g_{c3} \quad (3.9)$$

Измеренное (фактическое) значение расхода воды в трубопроводе рав-
но

$$Q = \frac{W}{t} \quad (3.10)$$

Сравниваются расчетные значения расхода воды в каждом сечении с фактическим значением расхода воды в трубопроводе.

Потери полного напора определяются по формуле (3.3).

Пьезометрический и гидравлический уклоны определяются по формулам (3.4) и (3.5).

Результаты расчетов характеристик заносятся в таблицу 3.1.

Выполняются анализ результатов исследования и выводы в целом по работе.

3.6 Вопросы к защите лабораторной работе

1. Запишите три формы уравнения Бернулли и расшифруйте входящие в него величины.

2. Запишите уравнение Бернулли для потока реальной /вязкой/ жидкости. Расшифруйте входящие в него члены.

3. Какая часть уравнение Бернулли характеризует потенциальную энергию и какая часть – кинетическую?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

4.1 Цель работы

Путем визуальных наблюдений ознакомиться с особенностями течения жидкости при ламинарном и турбулентном режимах движения. Определит значения числа Рейнольдса для наблюдаемых режимов движения.

4.2 Общие сведения

Экспериментальные исследования показали, что при течении жидкости наблюдается два основных режима - ламинарный и турбулентный. Ламинарный (слоистый) режим движения характеризуется прямолинейными или плавноизменяющимися траекториями и отсутствием перемешивания жидкости. При турбулентном (беспорядочном) режиме слоистый характер течения нарушается, происходит интенсивное перемешивание жидкости.

Для количественной оценки режимов движения жидкости используются безразмерное число или критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\varrho_c \cdot L}{\nu}, \quad (4.1)$$

где ϱ_c - средняя скорость потока жидкости, м/с;

L – характерный линейный размер м;

ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с, (см .Приложение А)

Для напорного течения жидкости в круглых трубах

$$\text{Re} = \frac{\varrho_c \cdot d}{\nu}, \quad (4.2)$$

где d - внутренний диаметр трубы, м.

Необходимость определения числа Рейнольдса имеет принципиальное значение при решении основной задачи инженерной гидравлики – расчете потерь полного напора. Установлено, что потери полного напора при ламинарном режиме движения жидкости зависят от средней скорости потока в первой степени, а при турбулентном- от средней скорости потока в степени, близкой к двум ($1,75 \div 2$).

Существуют два критических значения числа Рейнольдса, при которых происходит изменение режима движения жидкости. Нижнее критическое число $Re_{нк}$ ограничивает область ламинарного режима движения. Верхнее критическое число $Re_{вк}$ является началом области устойчивого турбулентного режима движения. Между $Re_{нк}$ и $Re_{вк}$ находится переходная область, где возможны ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости.

Для условий напорного течения жидкости в поле сил земного тяготения Рейнольдсом получены для круглой трубы следующие значения $Re_{нк}=2320$ и $Re_{вк} = 13800$. Если на поток воздействовать центробежными силами, магнитным полем или специальными добавками, то удаётся сохранить ламинарный режим до очень высоких значений Re .

4.3 Опытная установка.

Установка для изучения режимов движения жидкости (см. рисунок 4) включает напорный резервуар 1, соединенный стеклянной трубой 2 с приемным резервуаром 3. Подача воды по трубопроводу 4 и поддержание постоянного уровня воды в резервуаре 1 осуществляется с помощью вентиля 5. Регулирование расхода воды (скорости течения) в стеклянной трубе 2 выполняется вентилем 6. С помощью переливного устройства 7 вода может направляться в мерный резервуар 8 или сбросной отсек 9. Визуализация траекторий

движения частиц жидкости производится пуском красителя из резервуара 10 через кран 11 по трубе 12.

Измерительная часть установки состоит из термометра, секундомера, мерного резервуара 8, имеющего вентиль 13 для воды.

4.4 Порядок проведения опытов

Вентили 5 и 13 открываются. По стеклянной стенке резервуара 1 фиксируется его полное наполнение водой.

Открытием вентиля 6 устанавливается медленное течение воды в стеклянной трубе 2. Краном 11 производится пуск красителя в стеклянную трубу. Регулированием степени открытия вентиля 6 добиваются устойчивого положения прямой линии траектории движения красителя, что будет соответствовать ламинарному режиму движения жидкости. Указанные действия выполняются при положении переливного устройства 7, обеспечивающего слив воды в сбросной отсек 9.

Вентиль 13 закрывается. Переливное устройство 7 устанавливается в положения, обеспечивающее слив воды в мерный резервуар 8. С помощью секундомера определяется время наполнение мерного резервуара 8 от отметки 5 см. Термометром измеряется температура воды в резервуаре 1, затем вентиль 13 открывается. Результаты измерений заносятся в таблицу 4.1 для условий первого опыта.

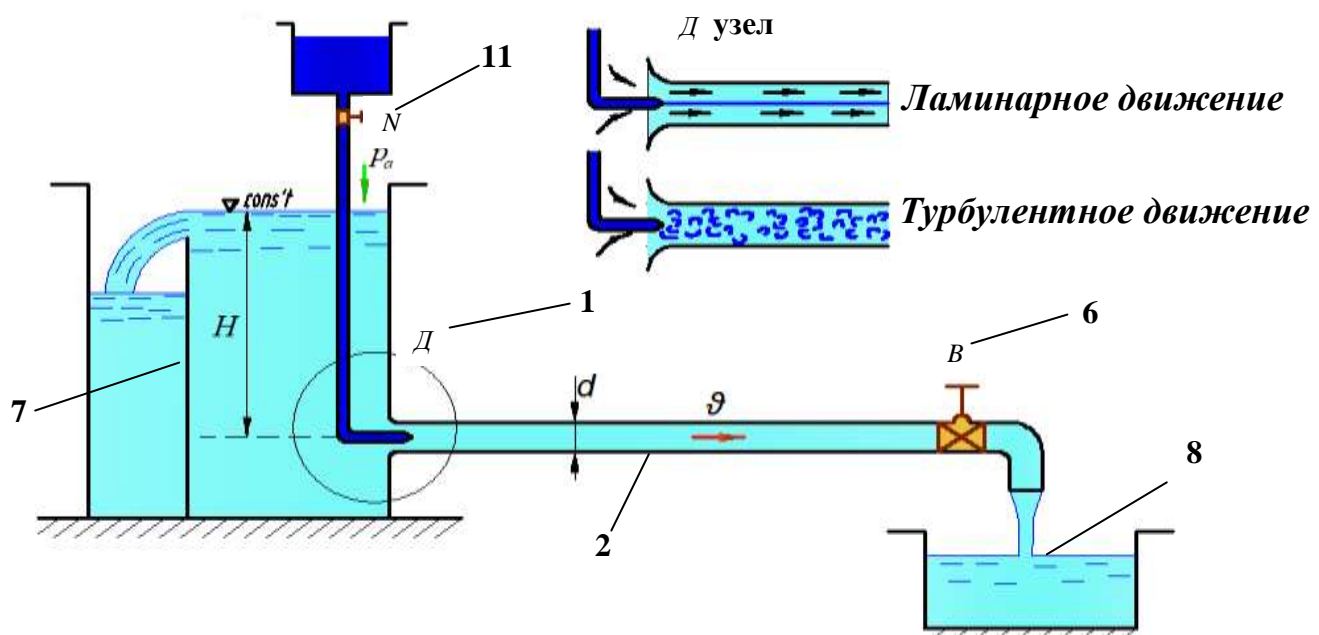


Рис.4. Схема опытной установки

Таблица 4.1.

Результаты измерений и обработки опытных данных

№ опыта	Измеренные величины			Расчетные величины				
	$T, ^\circ\text{C}$	W, cm^3	t, c	$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	$Q, \text{cm}^3/\text{c}$	$g_c, \text{cm}/\text{c}$	Re	Режим движения
1.								
2.								
3.								
4.								

Условные обозначение в таблице 4.1:

T – температура воды в градусах Цельсия;

W – объем воды в мерном резервуаре;

t – время наполнения мерного резервуара;

Q – расход воды.

Регулированием степени открытия вентиля 6 добиваются криволинейной линии траектории движения красителя, что будет соответствовать смене режимов движения жидкости – переходу от ламинарного к турбулентному. Вентиль 13 закрывается. С помощью секундомера определяется время наполнения водой мерного резервуара 8 от отметки 0 до отметки 10 см. Термометром измеряется температура воды в резервуаре 1. Затем вентиль 13 открывается. Результаты измерений заносятся в таблицу 4.1 для условий второго опыта.

Регулированием степени открытия вентиля 6 добиваются полного перемешивания красителя по живому сечению трубы, что будет соответствовать турбулентному режиму движения жидкости. Вентиль 13 закрывается. С помощью секундомера определяется время наполнения водой мерного резервуара 1. Термометром измеряется температура воды в резервуаре 1. Затем вентиль 13 закрывается. Результаты измерений заносятся в таблице 4.1 для условий третьего опыта.

4.5 Обработка опытных данных

Определяется расход воды в стеклянной трубе

$$Q = \frac{W}{t} \quad (4.3)$$

Определяются средняя скорость потока в трубе

$$g_c = \frac{Q}{\omega}, \quad (4.4)$$

где ω - площадь живого сечения трубы, см^2

$$\omega = 0,785 \cdot d^2 \quad (4.5)$$

Определяется кинематический коэффициент вязкости воды в зависимости от ее температуры (таблица 4.2).

Таблица 4.2.

Зависимость $\nu = f(T)$ для воды

T, °C	5	10	12	15	17	20
ν , $\text{см}^2/\text{с}$	0,0152	0,0131	0,0124	0,0114	0,0109	0,0101

По формуле (4.2) определяется число Рейнольдса.

Результаты расчетов заносятся в таблицу 4.1.

Выполняются анализ опытных данных и выводы об их соответствии результатам исследований Рейнольдса.

4.6 Вопросы к защите лабораторной работы

1. Что называют ламинарным и турбулентным движением?
2. Что называют числом Рейнольдса? Что такое $Re_{кр}$?
3. Как по числу Re определяют режим движения?

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА

5.1 Цель работы

Изучение потерь напора на трение по длине. Определение опытным путем значения коэффициента гидравлического трения трубопровода. Развитие навыков измерений и расчетов потерь полного напора на трение.

5.2 Общие сведения

Потери полного напора на трение h_L , м, при движении жидкости в круглых трубах определяются по формуле Дарси

$$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где λ - коэффициент гидравлического трения;

L - длина трубы, м;

v - средняя скорость потока, м/с;

d - внутренний диаметр трубы, м;

g - ускорение свободного падения, м/с².

В общем случае коэффициент гидравлического трения зависит от режима течения жидкости и шероховатости стенок трубы.

При ламинарном режиме течения коэффициент гидравлического трения λ определяется по формуле Пуазейля

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

где Re – число Рейнольдса потока трубы

$$Re = \frac{g \cdot d}{\nu}, \quad (5.3)$$

ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, m^2/c .

При переходном и турбулентном режимах течения коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Альтшуля, или по формуле К.Ш. Латипова достоверной для всех зон сопротивления гидравлический гладких и вполне шероховатых труб

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25} \quad (5.4)$$

где $\frac{\Delta_{\text{э}}}{d}$ – относительная эквивалентная шероховатость стенок трубы ($\Delta_{\text{э}}$ – абсолютная эквивалентная шероховатость, м).

При лабораторных исследованиях коэффициент гидравлического трения находят после элементарных преобразований формулы (5.1)

$$h_L = \frac{2g \cdot h_L \cdot d}{L \cdot g_c^2} \quad (5.5)$$

Потери полного напора на трение в формуле (5.5) определяются из уравнения Бернулли для двух сечений горизонтально расположенной трубы постоянного диаметра

$$h_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = \Delta h, \quad (5.6)$$

где P_1 – давление потока жидкости в первом сечении, Па;

P_2 – давление потока жидкости во втором сечении, Па;

ρ - плотность воды, кг/м³ ;

Δh - разность уровней воды в пьезометрах, м.

5.3 Опытная установка

Установка для определения коэффициента гидравлического трения (см. рисунок 5) состоит из напорного резервуара 1, подводящего трубопровода 2 с задвижкой 3, трубопровода 4 с краном 5.

Измерительная часть установки включает пьезометры 6 и 7, мерный резервуар 8, мерную линейку и секундомер.

5.4 Порядок поведения опытов

Открытием задвижки 3 и крана 5 в трубопроводе 4 устанавливается движение жидкости с максимально возможным расходом.

При установившемся движении жидкости измеряется разность уровней воды в пьезометрах 6 и 7. С помощью секундомера определяется время наполнения мерного резервуара 8.

Результаты измерений характеристик для трех параллельных опытов заносятся в таблицу 5.1.

Таблица 5.1.
Результаты измерений и обработки опытных данных

№ опыта	Измеренные величины					Расчетные величины			
	L, см	d, см ³	h _L , см	W, см ³	t, с	Q, см ³ /с	ω , см ² /с	g см/с	λ_o
1.									
2.									
3.									

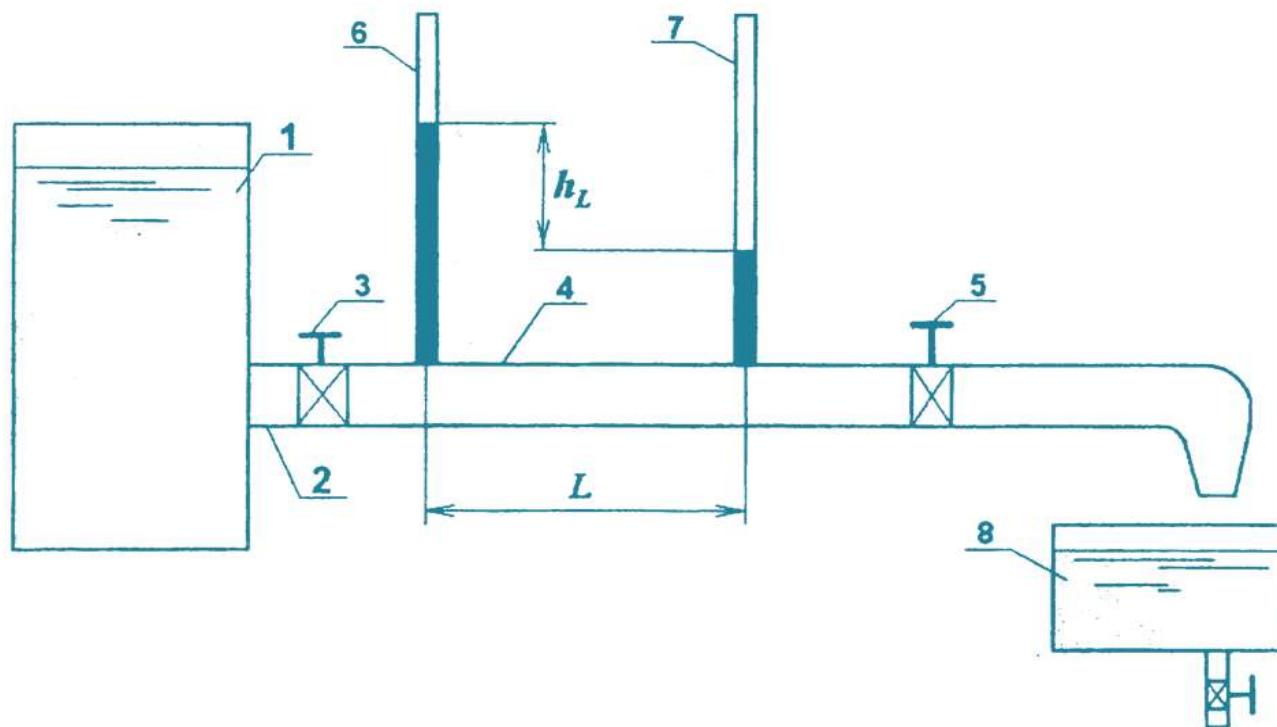


Рис.5. Схема опытной установки

Условные обозначения в таблице 5.1: W – объем мерного резервуара; t – время наполнения мерного резервуара; Q - расход воды в трубопроводе; ω - площадь живого сечения трубопровода.

5.5 Обработка опытных данных и их анализ

Определяется расход воды в трубе

$$Q = \frac{W}{t} \quad (5.7)$$

Определяется средняя скорость потока в трубе

$$g = \frac{Q}{\omega} \quad (5.8)$$

Определяется кинематический коэффициент вязкости воды в зависимости от ее температуры (см. работу № 4).

По формуле (5.3) определяется число Рейнольдса.

По формуле (5.5) определяется коэффициент гидравлического трения трубопровода. Среднее арифметическое по результатам трех параллельных опытов.

Результаты расчетов заносятся в таблицу 5.1.

Выполняется анализ результатов исследования и делается вывод об их соответствии литературным данным [1].

5.5 Вопросы к защите лабораторной работы

1. Запишите выражение для зависимости λ от Re при ламинарном движении /формулу Гагена-Пуазейля/.

2. Какой режим движения жидкости в трубопроводах называют автономным, или режимом шероховатого трения? Какая формула нужна для определения λ при таком режиме?

3. Запишите и расшифруйте формулу Альтшуля, К.Ш.Латипова для коэффициента гидравлического трения.

4. Что называют эквивалентной шероховатостью K_s ? От чего она зависит?

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА

6.1 Цель работы

Определение опытным путем значений коэффициентов местных сопротивлений трубопровода. Развитие навыков измерений и расчетов местных потерь полного напора.

6.2 Общие сведения

Местные сопротивления представляют собой короткие участки трубопроводов, на которых скорость потока изменяется по величине и (или) по направлению. К местным сопротивлениям относятся повороты трубопроводов, внезапные расширения и сужения живого сечения, задвижки, вентили, краны, клапаны и т.д.

Потери полного напора, возникающие при деформациях потока в местных сопротивлениях называются местными потерями напора h_m м, и определяются по формуле Вейсбаха

$$h_m = \zeta \cdot \frac{g_c^2}{2g}, \quad (6.1)$$

где ζ - коэффициент местного сопротивления;

g_c - средняя скорость потока в сечении после местного сопротивления, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

В общем случае коэффициент местного сопротивления зависит от режима движения жидкости и геометрии местного сопротивления.

При лабораторных исследованиях коэффициент местного сопротивления находят после элементарных преобразований формулы (6.1)

$$\zeta_{on} = \frac{2g \cdot h_m}{g_c^2} \quad (6.2)$$

Местные потери напора определяются из уравнения Бернулли для двух сечений потока (до и после местного сопротивления)

$$h_m = \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{g_1^2 - g_2^2}{2g} \right), \quad (6.3)$$

где $\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} \right)$ - разность пьезометрических напоров, м (P_1, P_2 - давление жидкости, соответственно, в первом и втором сечениях потока, Па; ρ - плотность жидкости, кг/м³);

$\left(\frac{g_1^2 - g_2^2}{2g} \right)$ - разность скоростных напоров, м (g_1, g_2 - средняя скорость потока, соответственно, в первом и втором сечениях, м/с).

6.3 Опытная установка

Установка для определения коэффициентов местных сопротивлений (см. рисунок 6) состоит из напорного резервуара 1, подводящего трубопровода 2 с задвижкой 3, трубопровода 4, на котором последовательно расположены местные сопротивления : внезапное расширение трубы 5, диафрагма 6, задвижка 7.

Измерительная часть установки включает пары пьезометров 8 и 9, 10 и 11, 12 и 13, мерный резервуар 14 и секундомер. Каждая пара пьезометров

присоединена к трубопроводу 4 в соответствующих сечениях до и после местных сопротивлений и установлена на щите с измерительными шкалами.

6.4 Порядок проведения опытов

Открытием задвижки 3 в трубопроводе 4 устанавливается движение жидкости с некоторым расходом.

При установившемся движении жидкости измеряются разности уровней воды в пьезометрах 8 и 9, 10 и 11, 12 и 13.

С помощью секундомера определяется время наполнения мерного резервуара 14.

Результаты измерений характеристик для трех параллельных опытов заносятся в таблицу 6.1, 6.2, 6.3.

Таблица 6.1.

Результаты измерений и обработки опытных данных для внезапного расширения трубопровода

№ опыта	Измеренные величины						Расчетные величины								
	$W, \text{см}^3$	$t, \text{с}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$\frac{P_1}{\gamma}, \text{см}$	$\frac{P_2}{\gamma}, \text{см}$	$Q, \text{см}^3/\text{с}$	$\omega_1, \text{см}^2$	$\omega_2, \text{см}^2$	$g_1, \text{см/с}$	$g_2, \text{см/с}$	$h_m, \text{м}$	ζ_{on}	ζ_m	$\frac{\Delta\zeta}{\zeta_{on}}, \%$
1.															
2.															
3.															

Таблица 6.2.

Результаты измерений и обработки опытных данных для диафрагмы

№ опыта	Измеренные величины						Расчетные величины								
	$W, \text{см}^3$	$t, \text{с}$	$d_1, \text{мм}$	$d_d, \text{мм}$	$\frac{P_1}{\gamma}, \text{см}$	$\frac{P_2}{\gamma}, \text{см}$	$Q, \text{см}^3/\text{с}$	$\omega_1, \text{см}^2$	$\omega_d, \text{см}^2$	$\frac{\omega_d}{\omega}$	$g_c, \text{см/с}$	$h_m, \text{м}$	ζ_{on}	ζ_m	$\frac{\Delta\zeta}{\zeta_{on}}, \%$
1.															
2.															
3.															

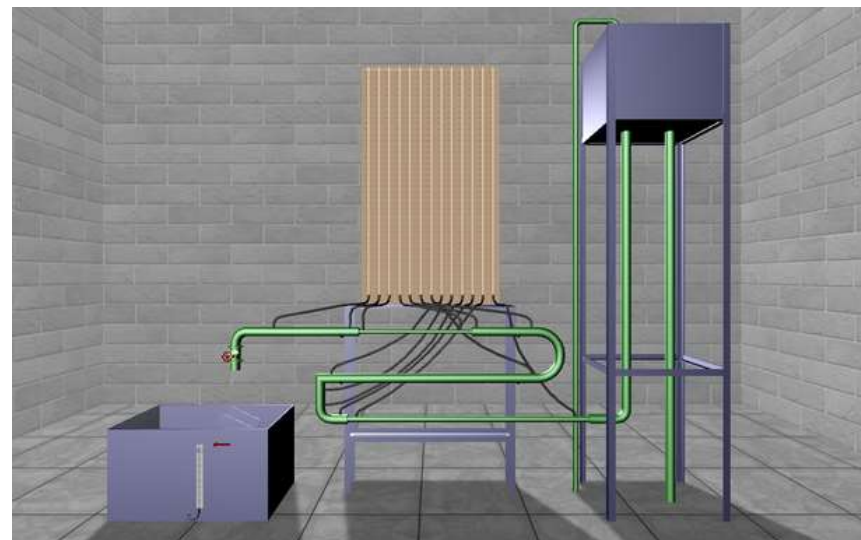
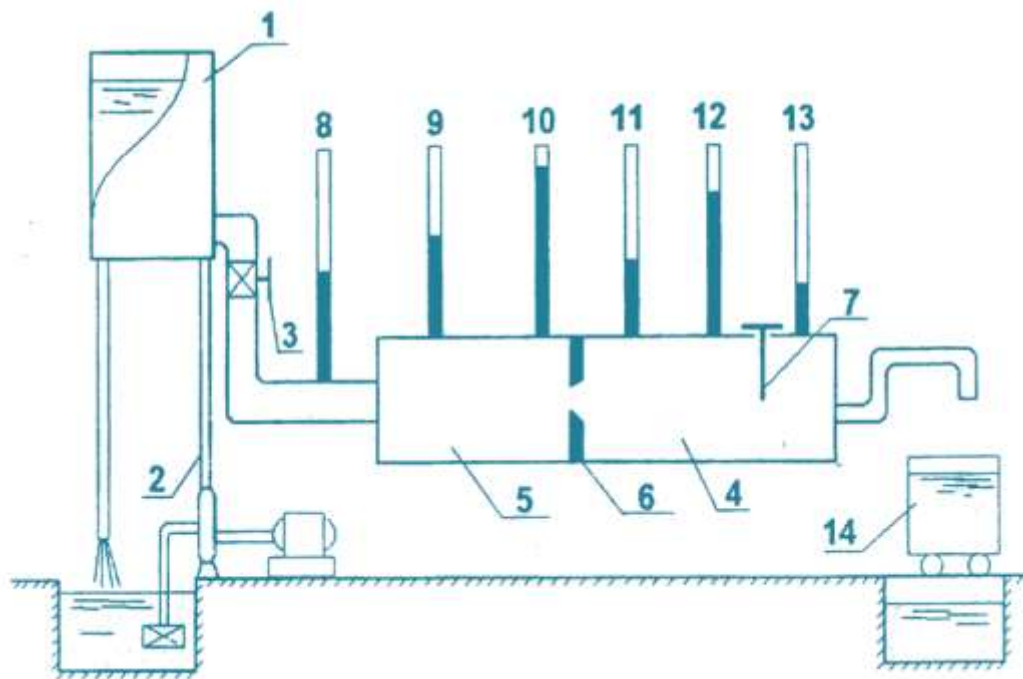


Рис.6. Схема опытной установки

Таблица 6.3.

**Результаты измерений и обработки опытных данных
для задвижки**

№ опы- та	Измеренные величины					Расчетные величины					
	W, см ³	t, с	d, мм	$\frac{P_1}{\gamma}$, см	$\frac{P_2}{\gamma}$, см	Q, см ³ /с	ω , см ²	g_c , см/с	h _м , м	ζ_{on}	ζ_m
1.											
2.											
3.											

Условные обозначения в таблицах 6.1...6.3: W – объем воды в мерном резервуаре; t – время наполнения мерного резервуара; d₁, d₂ – диаметр трубопровода, соответственно до и после внезапного расширения; Q – расход воды в трубопроводе; ω_1 , ω_2 – площадь живого сечения трубопровода, соответственно до и после внезапного расширения; G_T – теоретическое значение коэффициента местного сопротивления; $\Delta\zeta$ – разность между опытным и теоретическим значениями коэффициента местного сопротивления; d – диаметр трубопровода; d_г – диаметр отверстия диафрагмы; ω , ω_g – площадь живого сечения, соответственно, трубопровода и диафрагмы; g_c – средняя скорость потока в трубопроводе.

6.5 Обработка опытных данных

6.5.1 Определение коэффициента местного сопротивления внезапного расширения трубопровода

Определяется расход воды в трубопроводе

$$Q = \frac{W}{t} \quad (6.4)$$

Определяются площади живых сечений до и после внезапного расширения трубопровода

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= 0,785 \cdot d_1^2 \\ \omega_2 &= 0,785 \cdot d_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

Определяются средние скорости потока в указанных сечениях

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \frac{Q}{\omega_1} \\ g_2 &= \frac{Q}{\omega_2} \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

Местные потери напора определяются по формуле (6.3).

По формуле (6.2) определяется опытное значение коэффициента местного сопротивления внезапного расширения трубопровода.

Теоретическое значение коэффициента местного сопротивления внезапного расширения трубопровода находится по формуле

$$\zeta_T = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right) \quad (6.7)$$

Степень расхождения между опытными и теоретическими значениями коэффициента местного сопротивления внезапного расширения трубопровода определяется по формуле

$$\frac{\Delta \zeta}{\zeta_{оп}}, \% = \frac{\zeta_{оп} - \zeta_T}{\zeta_{оп}} \cdot 100\% \quad (6.8)$$

Результаты расчетов характеристик заносятся в таблицу 6.1.

6.5.2 Определение коэффициента местного сопротивления диафрагмы

Измеренные и расчетные величины, одинаковые для диафрагмы и внезапного расширения трубопровода, переносятся из таблицы 6.1 в таблицу 6.2.

Определяются площади живого сечения диафрагмы и трубопровода

$$\left. \begin{aligned} \omega_g &= 0,785 \cdot d_g^2 \\ \omega &= 0,785 \cdot d^2 \end{aligned} \right\} \quad (6.9)$$

Определяется средняя скорость потока в трубопроводе

$$g_c = \frac{Q}{\omega} \quad (6.10)$$

Местные потери напора определяются по формуле (6.3).

По формуле (6.2) определяется опытное значение коэффициента местного сопротивления диафрагмы.

Теоретическое значение коэффициента местного сопротивления диафрагмы находится по формуле

$$\zeta_T = \left(\frac{\omega_2}{\omega_g \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (6.11)$$

где ε - коэффициент сжатия потока (таблица 6.4).

Таблица 6.4
Значения коэффициента сжатия потока диафрагмой

ω_g / ω	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
ε	0,613	0,618	0,623	0,631	0,642	0,656	0,678	0,713

Степень расхождения между опытными и теоретическими значениями коэффициента местного сопротивления диафрагмы определяется по формуле (6.8).

Результаты расчетов характеристик заносятся в таблицу 6.2.

6.5.3 Определения коэффициента местного сопротивления задвижки.

Измеренные и расчетные величины, одинаковые для задвижки и внезапного расширения трубопровода, переносятся из таблицы 6.1 в таблицу 6.3.

Определяется площадь живого сечения трубопровода

$$\omega = 0,785 \cdot d^2 \quad (6.12)$$

Определяется средняя скорость потока в трубопроводе

$$g_c = \frac{Q}{\omega} \quad (6.13)$$

Местные потери напора определяются по формуле (6.13).

По формуле (6.2) определяется опытное значение коэффициента местного сопротивления задвижки.

Результаты расчетов характеристик заносятся в таблицу 6.3.

Выполняются анализ результатов исследования и выводы в целом по работе.

6.6 Вопросы к защите лабораторной работы

1. Причины возникновения местных потерь напора .
2. С чем связаны потери напора при внезапном расширении потока? Покажите соответствующую схему .
3. С чем связана потеря напора при изменении направления потока? Начертите соответствующую схему.
4. Запишите и расшифруйте формулу для определения коэффициентов местных потерь в переходной области.

III. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСХОДА ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

7.1 Цель работы

Изучение особенностей истечения жидкости через отверстие и насадки при постоянном напоре жидкости. Развитие навыков измерений и расчетов расходных характеристик истечения жидкости.

7.2 Общие сведения

Установившийся процесс истечения жидкости через отверстие и насадки сопровождается сложными деформациями струй, образованием зон вакуума, кавитационными явлениями и т.д.

Наибольшая средняя скорость потока в сжатом сечении струи называется скоростью истечения жидкости v , м/с, и определяется по формуле

$$v = \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot H}, \quad (7.1)$$

где φ - коэффициент скорости, учитывающий влияние потерь напора на скорость истечения жидкости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \quad (7.2)$$

где ζ - коэффициент местного сопротивления при истечении жидкости;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – напор жидкости над центром тяжести выходного сечения, м.

Степень сжатия струи оценивается коэффициентом сжатия ε

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (7.3)$$

где ω_c - площадь сжатого сечения струи, м^2 ;

ω - площадь выходного сечения, м^2 .

Расход жидкости, вытекающей из отверстия или насадка Q , $\text{м}^3/\text{с}$, определяется по формуле

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot H} \quad (7.4)$$

где μ - коэффициент расхода отверстия или насадка

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi \quad (7.5)$$

В общем случае коэффициент расхода зависит от физико-химических свойств, режима движения жидкости (оцениваемого числом Рейнольдса) и геометрии гидравлического устройства.

При лабораторных исследованиях коэффициент расхода находят после элементарных преобразований формулы (7.4)

$$\mu = \frac{Q}{Q_T} \quad (7.6)$$

где Q – расход жидкости из отверстия или насадка, определенный опытным путем, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_T – расход жидкости из отверстия или насадка, определенный расчетным путем по формуле (7.4) в предположении отсутствия сжатия струи ($\varepsilon = 1$) и потерь напора при истечении жидкости ($\zeta = 0, \varphi = 0$), т.е. $\mu = 1$.

7.3 Опытная установка

Установка для изучения процессов истечения жидкости через отверстие и насадки (см. рисунок 7) состоит из напорного резервуара 1, подводящего трубопровода 2 с задвижкой 3 и отводящего канала 4. В боковой стенке резервуара имеется отверстие 5 с внутренней резьбой, в которое с помощью прижимной шайбы 6 устанавливается сменный диск с насадками. Отверстие 5 открывается и закрывается специальным клапаном 7, расположенным в напорном резервуаре 1. Для обеспечения постоянного значения напора жидкости резервуар оборудован переливным (водосбросным) устройством 8.

Измерительная часть установки включает пьезометр 9 для измерения напора жидкости, мерный резервуар 10 с вентилем 11 и струенаправляющим устройством 12, секундомер и измерительную линейку.

7.4 Порядок проведения опытов

Измеряются внутренние размеры мерного резервуара, диаметры отверстия и насадкой. Результаты измерений заносятся в таблицу 7.1.

Открытием задвижки 3 вода подается по подводящему трубопроводу 2 в напорный резервуар 1. Наполнение резервуара 1 соответствует моменту начала слива воды через переливное устройство 8 в отводящий канал 4.

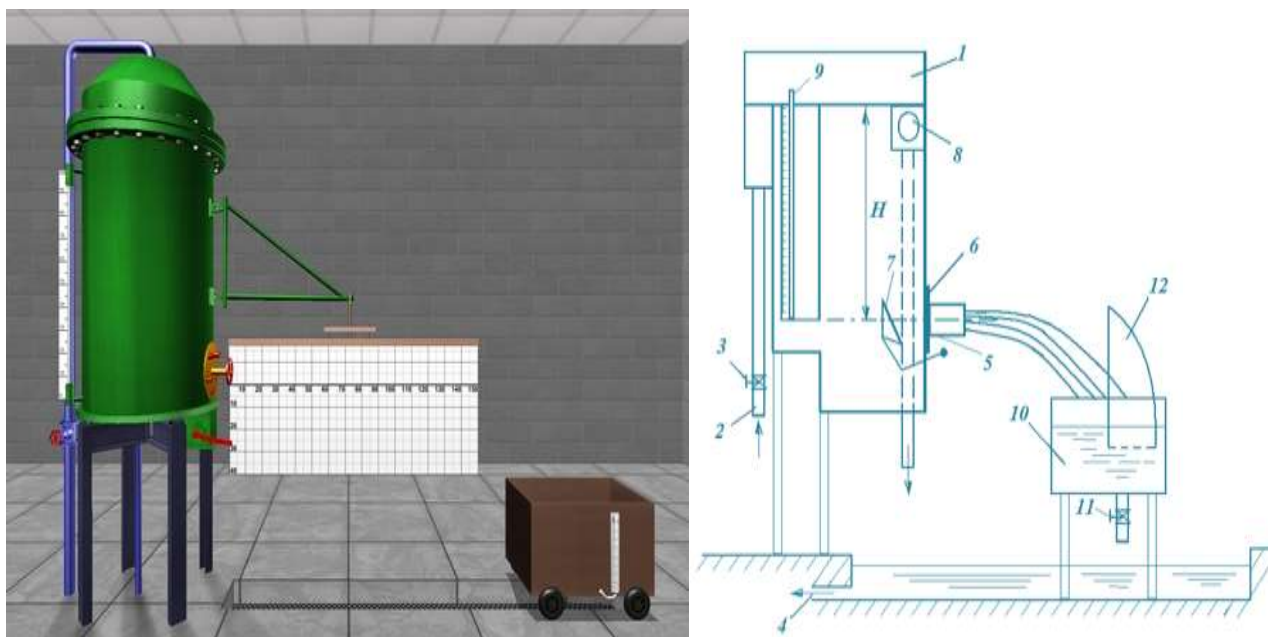


Рис. 7. Схема опытной установки: 1 – резервуар; 2 – подводящий трубопровод; 3 – вентиль; 4 – отводящий трубопровод; 5 – отверстия; 6 – диск; 7 – клапан; 8 – сливной резервуар; 9 – пьезометр; 10 – мерный резервуар.

В отверстие 5 резервуара устанавливается диск с отверстием в тонкой стенке.

Мерный резервуар 10 опорожняется, а затем закрывается вентилем 11.

Открывается клапан 7, с помощью секундомера определяется время наполнения мерного резервуара 10. Одновременно по пьезометру 9 измеряется величина напора жидкости.

Мерный резервуар 10 опорожняется вентилем 11.

Результаты измерений характеристик для трех параллельных опытов заносятся в таблицу 7.1.

Производится замена диска с насадком определенного типа и процедура эксперимента повторяется.

Таблица 7.1

Результаты измерений

Тип отверстия, насадка		Измеренные величины					
Наименование	Усл. обозн.	l , см	b , см	h , см	d , см	H , см	t , с
Отверстие в тонкой стенке							
Внешний цилиндрический насадок (Вентури)							
Внешний конический сходящийся насадок							
Внешний конический расходящийся насадок							

Таблица 7.2

Результаты обработки опытных данных

Тип отверстия, насадка	W , см ³	ω , см ²	Q_T , см ³ /с	Q , см ³ /с	μ	μ_T	$\frac{\Delta\mu}{\mu_T}$, %

Условные обозначения в таблицах 7.1, 7.2: l , b , h , W – соответственно: длина, ширина, высота и объем мерного резервуара; d , ω - соответственно: диаметр и площадь выходного сечения отверстия и насадка; t – время наполнения мерного резервуара водой; μ_T - табличное значение коэффициента расхода отверстия или насадка, определяется по Приложению Б.

7.5 Обработка опытных данных и их анализ

Определяется объем мерного резервуара

$$W = l \cdot b \cdot h \quad (7.7)$$

Определяется площадь выходного сечения отверстия и насадков

$$\omega = 0,785 \cdot d^2 \quad (7.8)$$

Определяется расход воды при истечении через отверстие в тонкой стенке и насадки

$$Q = \frac{W}{t} \quad (7.9)$$

Определяется теоретическое значение расхода воды при истечении через выходное сечение отверстия и насадков

$$Q = \omega \cdot \sqrt{2g \cdot H} \quad (7.10)$$

Опытные значения коэффициентов расхода отверстия и насадков находят по формуле (7.6), табличные значения – по Приложению Б.

Определяется разность опытных и табличных значений коэффициентов расхода отверстия и насадков, обусловленная погрешностью опытов

$$\Delta\mu = \mu - \mu_T \quad (7.11)$$

Относительная ошибка опытных значений коэффициентов расхода отверстия и насадков определяется по следующей зависимости

$$\frac{\Delta\mu}{\mu_T}, \% = \frac{\mu - \mu_T}{\mu_T} \cdot 100\% \quad (7.12)$$

Результаты расчетов заносятся в таблицу 7.2.

Выполняются анализ результатов исследования и выводы в целом по работе.

7.6 Вопросы к защите лабораторной работы

1. По какой формуле определяется средняя скорость потока в сжатом сечении струи?
2. Чем вызвано сжатие струи?
3. Физический смысл коэффициента расхода при истечении жидкости через отверстия и насадки.
4. От каких основных факторов зависит коэффициент расхода отверстия или насадка?

8. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ ЖИДКОСТИ

8.1 Цель работы

Наблюдения и измерения геометрических характеристик процесса истечения жидкости через отверстие и насадки.

Определение коэффициентов скорости и расхода отверстия и насадков.

8.2 Общие сведения

Важнейшими геометрическими характеристиками струи являются:

x - дальность полета струи (горизонтальная координата струи), м;

y - высота полета струи (вертикальная координата струи), м.

Началом координат является центр сжатого сечения струи. Коэффициент скорости φ (см. подраздел 7.2 предыдущей лабораторной работы) можно определить из уравнения траектории осевой линии струи

$$\varphi = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{H \cdot y}}, \quad (8.1)$$

где H – напор воды, м.

8.3 Опытная установка

Установка (см. рисунок 8) состоит из резервуара 1, выполненного в виде основания; напорного резервуара 2 с резьбовым отверстием стенке, куда устанавливается сменный диск с отверстием в тонкой стенке или насадком 3; координатного устройства, состоящего из кронштейна 4 и измерительных тоsters 5; мерного резервуара 6 с краном 7.

На крышке резервуара 1 смонтирован и погружен в воду электронасос 8, подающий воду в напорный резервуар 2 через кран 9. Напорный резервуар имеет переливное (водосбросное) устройство, обеспечивающее наибольшее значение напора воды; прозрачную стенку с четырьмя рисками, предназначенными для проведения опытов при четырех значениях напора воды. Постоянство напора воды обеспечивается регулировкой краном 9 подачи расхода воды в напорный резервуар 2, равного расходу истечения из отверстия или насадка.

Измерительная часть установки состоит из пяти измерительных тестеров 5, управляемых маховичками; тарировочного графика; мерного резервуара 6 с краном 7; секундомера, термометра и измерительной линейки.

8.4 Порядок проведения опытов

Измеряются температура воды, диаметры выходного сечения отверстия и насадков.

В резьбовое отверстие напорного резервуара 2 устанавливается сменный диск с отверстием в тонкой стенке 3.

Включается электронасос 8, открытием крана 9 устанавливается первое (наибольшее) значение постоянного напора воды в напорном резервуаре 2.

Секундомером определяется время наполнения мерного резервуара 6 при закрытом кране 7 от начального до конечного уровня воды. Затем кран 7 открываются.

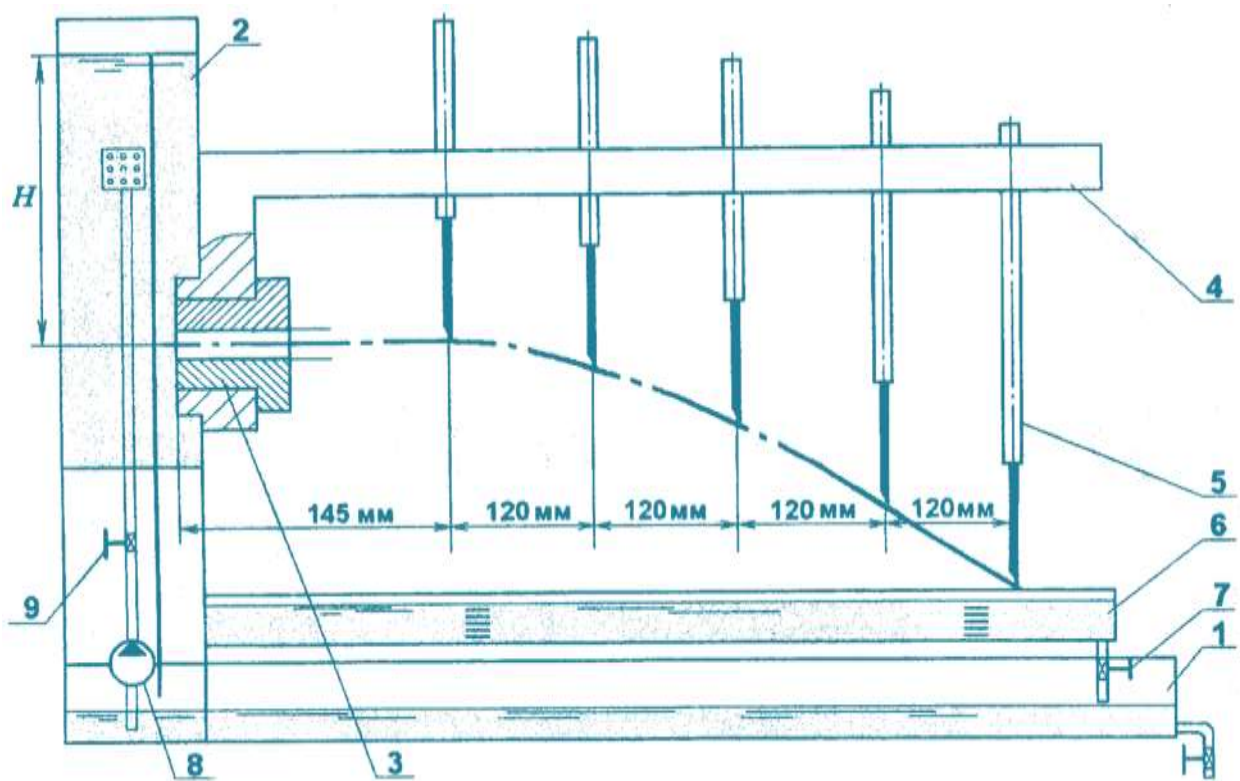


Рис. 8. Схема опытной установки

С помощью координатного устройства 4, 5 измеряются горизонтальные и вертикальные координаты точек траектории струи.

Результаты всех измерений заносятся в таблицу 8.1.

Регулированием крана 9 устанавливается второе значение постоянного напора воды в напорном резервуаре 2. При закрытом кране 7 повторяются измерения секундомером и координатным устройством.

Вышеописанная процедура эксперимента повторяются при других значениях постоянного напора воды и для всех типов насадков после последовательной установки сменных дисков.

Таблица 8.1

Результаты измерений

Тип отверстия		$T, ^\circ\text{C}$	$d, \text{см}$	$H, \text{см}$	$h_{\text{Н}}, \text{см}$	$h_{\text{К}}, \text{см}$	$t, \text{с}$	x	y
Наименование	Усл. обозн.								
Отверстие в тонкой стенке									
Внешний цилиндрический насадок									

Насадок со скругленными выходными кромками										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 8.2

Результаты обработки опытных данных

Тип отверстия, насадка	ω , см ²	ν , см ² /с	W_H , см ³	W_K , см ³	W , см ³	Re	μ	$\frac{\Delta\mu}{\mu_T}$, %	φ	$\frac{\Delta\varphi}{\varphi_T}$, %

Условные обозначения в таблицах 8.1, 8.2: T , ν – температура и кинематический коэффициент вязкости воды; d , ω – диаметр и площадь выходного сечения отверстия в тонкой стенке или насадка; h_H , W_H , h_K , W_K , W – соответственно: начальный уровень и начальный объем воды в мерном резервуаре, конечный уровень и конечный объем воды в мерном резервуаре, изменение объема воды в мерном резервуаре за время накопления; t – время накопления; Re – число Рейнольдса; μ – коэффициент расхода отверстия или насадка.

8.5 Обработка опытных данных и их анализ

С помощью таблицы 4.1 при замеренной термометром температуре воды находится соответствующее значение коэффициента кинематический вязкости воды.

Определяется площадь выходного сечения отверстия и насадков

$$\omega = 0,785 \cdot d^2 \tag{8.2}$$

По тарировочному графику установки определяется изменение объема воды в мерном резервуаре за время наполнения

$$W = W_K - W_H \quad (8.3)$$

Последовательно определяются:

а) расход воды

$$Q = \frac{\Delta W}{t} \quad (8.4)$$

б) средняя скорость течения

$$g = \frac{Q}{\omega} \quad (8.5)$$

в) число Рейнольдса

$$Re = \frac{g \cdot d}{\nu} \quad (8.6)$$

Значения коэффициентов скорости φ определяются по формуле (8.1); коэффициента расхода μ - по формуле (7.4...7.6) работы №7.

Выполняются анализ результатов исследования и выводы в целом по работе.

8.6 Вопросы к защите лабораторной работы

1. От каких основных факторов зависит дальность полета струи?
2. Особенности истечения жидкости через насадок со скругленными кромками.
3. Действием какой силы обусловлена траектория полета струи?
4. От каких основных факторов зависит коэффициент скорости отверстия или насадка?

9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НАСОСОВ

9.1 Общие сведения

Насосами называются машины для создания напорного потока жидкой среды.

Насосы различают на динамические (лопастные, электромагнитные, насосы трения и др.) и объемные (возвратно-поступительные, крыльчатые, роторные и др.).

Агрегат состоящий из насоса (или нескольких насосов) и приводящего двигателя соединенных друг с другом, называется насосным агрегатом.

Основные технические показатели насосов:

1) Объемная подача насоса Q ($\text{м}^3/\text{с}$) – объем жидкости, подаваемой насосом в единицу времени.

2) Давления насоса P – определяется зависимостью:

$$P = P_H - P_B + \rho \frac{g_H^2 - g_B^2}{2} + \rho g (Z_n - Z_B) \quad (9.1)$$

где P_H и P_B – соответственно давления на выходе в насос и g - средние скорости жидкости на выходе и входе в насос; Z_n и Z_B высоты центров тяжести сечений на выходе и входе в насос.

3) Напор насоса H – разность удельных энергий при выходе из насоса и на входе в него, выраженная высотой столба подаваемой жидкости

$$H = \frac{P_{ман}}{\rho g} + \frac{P_{вак}}{\rho g} + h_0 + \frac{g_H^2 - g_B^2}{2g} \quad (9.2)$$

где $P_{ман}$ и $P_{вак}$ – соответственно показания манометра и мановакуумметра; h_0 – вертикальное расстояние между точкой подключения мановакуумметра и манометра; g_H и g_B - скорости жидкости в местах отбора давлений.

Следует отметить, что если давление на входе в насос больше атмосферного, то второй член формуле (9.2) отрицательный. Если диаметры всасывающего и нагнетательного патрубков одинаковые, то последний член в формуле (9.2) отрицательный. Если диаметры всасывающего и нагнетательного патрубков одинаковые, то последний член в выражении (9.2) равен нулю.

4) Полезная мощность насоса $N_{п}$ – мощность, сообщаемая насосом подаваемой жидкости:

$$N_{п} = \rho g Q H, \quad (9.3)$$

5) КПД насоса η -отношение полезной мощности к мощности насоса:

$$\eta = \frac{N_{жс}}{N} \quad (9.4)$$

9.2 Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является экспериментальная исследования насосов при отдельной и совместной работы их. В соответствии с этой целью ставятся следующие задачи:

- 1) Построить напорную характеристику насоса при отдельной работе;
- 2) Построить суммарную напорную характеристику насосов при последовательном и параллельном соединении насосов;
- 3) Проанализировать работы насосов по построенным напорным характеристикам;
- 4) Произвести оценку результатов опыта.

9.3 Опытная установка

Схема лабораторной установки показана на рис.9.

Она состоит из 2-х насосов марки $1\frac{1}{2}K-6$, которых можно соединить и параллельно и последовательно, при помощи соединительной трубы. На схеме показано работа одного насоса.

Вода забирается из лотка бассейна (12), которая заполняется водопроводным краном (11), насосами (1, 2), первоначально через всасывающие трубопроводы (4, 5).

Для измерения давлений во всасывающих и напорных трубопроводах установлены соответственно мановакуумметры (7, 10) и манометры (7, 8).

Для регулирования режима работы установлены задвижки (10, 11, 15, 18) проходящий через общий напорный трубопровод (6).

Таким образом получается замкнутая система, работающая на постоянном объеме воды.

9.4 Порядок проведения опытов

Работа выполняется в 3-этапе. Первый этап – испытание насоса при отдельной работе. Второй этап – испытание насосов при параллельном соединении. Третий этап – испытание насосов при последовательном соединении.

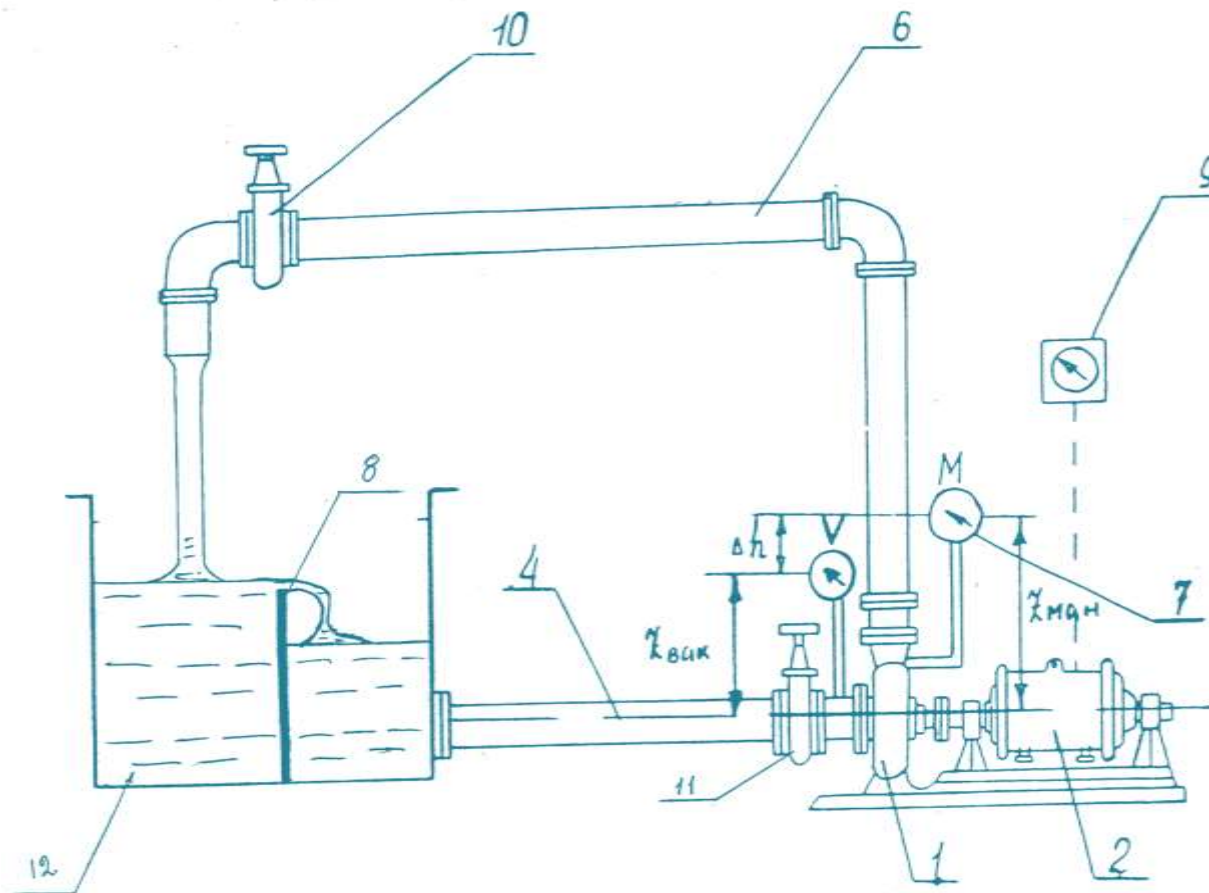


Рис 9. Схема экспериментальной установки для испытания центробежного насоса; 1 – центробежный насос; 2 – электродвигатель; 3 – резервуар; 4 – всасывающий трубопровод; 5 – вакуумметр; 6 – напорный трубопровод; 7 – манометр; 8 – мерная диафрагма; 9 – ваттметр;

Первый этап – испытание одного насоса.

Здесь режим работы устанавливается задвижкой (15), с помощью которой расход можно изменять от нуля до некоторого максимума (полное открытие). При каждом открытии задвижки определяется Q , H .

Исследование начинается при полностью закрытой задвижке на напорном трубопроводе в следующей последовательности:

1) Задвижки (15) полностью закрыт т.е. при $Q=0$ фиксируется показания вакуумметра (9) и манометра (7).

По полученным данным определяется H .

$$H=H_{вс}+H_2$$

где $H_{вс}$ – высота всасывания, определяется по показаниям вакуумметра.

H_2 – высота нагнетания, определяется по показаниям манометра

h_0 – высота установки прибора, определяется при выполнении лабораторной работы.

2) Изменяется режим насоса с помощью регулировки задвижки. Так же фиксируется показания вакуумметра, манометра и определяется H .

При помощи водомерного водослива (8), используя график $Q=f(h)$ или по формуле определяется расход потока

$$Q = \alpha \cdot H^\beta$$

где α , β - эмпирические коэффициенты уточняются при определении подачи насоса.

Таким образом, исследования повторяется до полного открытия задвижки (10) 4-5 раз.

Результаты испытания заносятся в таблицу 9.1 и по данным таблицы строится напорная характеристика насоса.

Второй этап – испытание двух параллельно работающих насосов.

Лабораторная установка приводится в состояние параллельной работы двух насосов, т.е. задвижки (10). Задвижки (14), (15) открыты.

Исследование производится в следующем порядке:

1) При полном закрытии задвижки 10, фиксируются показания мановакуумметра 7, если насосы одинаковые, оба они должны показывать идентичные значения.

2) При помощи регулировочной задвижки (10), изменяется режим работы системы насосов и для каждого установленного режима.

Фиксируются показания манометра и уровня воды (8). Определяется значение H и Q .

Таким образом исследование повторяется до полного открытия задвижки (10) 4-5 раз.

Результаты испытания заносятся в таблицу 9.2.

По полученным данным строится суммарная напорная характеристика насосов при параллельной работе.

Третий этап. Испытание двух последовательно работающих насосов.

Лабораторная установка приводится в состояние последовательной работы двух насосов т.е. задвижки 15 полностью закрыты, задвижки 13 полностью открыта.

Регулирование режима производится при помощи задвижки 10.

Исследование производится в следующем порядке:

1) При полном закрытии задвижки 10, фиксируются показания мановакуумметра 9 и определяется $H_{вс}$.

2) При помощи регулировочной задвижки 10, изменяется режима работы системы насосов. Для каждого установленного режима фиксируются показания манометра и уровень воды на водомерной рейки (8).

3) Определяются значения H и Q .

4) Полученные данные сводится в таблицу.

5) По результатам расчета строится напорная характеристика $H=f(Q)$ последовательно соединенных двух одинаковых насосов. Исследования проводятся до полного открытия задвижки (10) примерно 4-5 раз.

9.5 Обработка опытных данных и их анализ

Анализ и оценка результатов исследования производится следующим образом:

1. Для оценки работы отдельно работающего насоса на график $H=f(Q)$, наносится проектная характеристика насоса $H=f(Q)$.

2. Путем сравнения полученных и проектных данных оцениваются результаты исследования.

3. Для оценки работы параллельно работающих насосов на график $H=f(Q)$ построенный по данным, полученной при параллельной работы насосов наносится суммарная кривая связи, полученную путем удваивания абсцисс, соответствующих одному и тому же напору H .

4. Путем сравнения данных, полученных из эксперимента и вычислительных при помощи удваивания абсцисс оцениваются результаты второго этапа исследований.

5. Для оценки работы последовательно соединенных двух одинаковых насосов на график, наносится график, полученных путем удваивания ординат, соответствующих одному и тому же.

6. Путем сравнения данных полученных в результате эксперимента и вычисленных теоретически производится оценка исследований.

Таблица 9.1.

Результаты измерений

№ п.п.	Показание вакуумметра В, кгс/см ²	Показание манометра М, кгс/см ²	Показание ваттметра W, кВт	Показание дифманометра h, мм	Подача Q, л/с	Частота вращения насоса n, об/мин	КПД двигателя η , %	Разность высот размещения манометра и вакуумметра, $\Delta h = z_{ман} - z_{вак}$, см
1								
2								
3								
4								

Таблица 9.2.

Результаты вычислений и обработки опытных данных

№ п.п.	Наименование величин	Номер опыта						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Показание вакуумметра в м вод. ст. $H_B = B \cdot 10$							
2	Показание манометра в м вод. ст. $H_M = M \cdot 10$							
3	Подача насоса $Q \cdot 10^{-3}$, м ³ /с							
4	Средняя скорость во всасывающем трубопроводе $g_B = \frac{4Q}{\pi d_{BC}^2}$, м/с							
5	Средняя скорость в напорном трубопроводе $g_H = \frac{4Q}{\pi d_H^2}$, м/с							
6	Скоростной напор во всасывающем трубопроводе $\frac{g_B^2}{2g}$, м							
7	Скоростной напор в напорном трубопроводе $\frac{g_H^2}{2g}$, м							
8	Напор насоса, м $H = H_B + H_H + \frac{g_H^2 - g_B^2}{2g} + \Delta h$							
9	Полезная мощность насоса $P_G = \frac{\rho g Q H}{1000}$, кВт							
10	Мощность электродвигателя $P_{ДВ} = 3W$, кВт							
11	Мощность, подведенная к валу насоса $P_H = P_{ДВ} \eta_{ДВ} \eta_{ПЕР}^*$, кВт							
12	КПД насоса $\eta_H = \frac{P_{II}}{P_H}$							

Примечание. $\eta_{ПЕР}$ - КПД передачи принять равным 1.

Анализ результатов исследований проводится студентами самостоятельно, каждый студент в письменной форме представляет свои выводы.

9.6 Вопросы к защите лабораторной работы

1. Перечислите признаки по которым классифицируют гидромашины?
2. Что называют принцип действия гидромашины?
3. Основные допущения, используемые при выводе уравнения Эйлера.
4. Изменяется ли теоретический напор динамического насоса при изменении плотности рабочей жидкости?

10. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

10.1 Цель работы

Целью работы является определение характеристик гидроприводов поступательного движения при установке регуляторов потока на входе, на выходе и на ответвлении.

10.2 Основные понятия и определения

Регулируемый гидропривод – это объемный гидропривод, в котором скорость выходного звена объемного гидродвигателя может регулироваться по требуемому закону.

Гидроприводы с дроссельным регулированием – это такие регулируемые гидроприводы, в которых регулирование осуществляется каким-либо регулирующим гидроаппаратом (например, дросселем или регулятором потока); насосы и гидродвигатели в таких гидроприводах являются нерегулируемыми.

Гидроприводы с дроссельным регулированием скорости являются наиболее простыми и дешевыми, эти гидроприводы могут иметь большой диапазон изменения скорости (до 1:1000 и более). Недостатками этих гидроприводов является повышенные потери мощности связанный с этим излишний нагрев рабочей жидкости. Дроссельное регулирование скорости применяется обычно в гидроприводах небольшой мощности (до 15-20 кВт).

В гидроприводах с дроссельным регулированием скорости могут иметь место различные схемы установки дросселя.

На схемах представленных на рис. 10.1 – 10.3 в качестве гидродвигателя используется гидроцилиндр. Изменение направления движения потока гидроцилиндра осуществляется с помощью направляющего гидрораспределителя.

Средняя скорость перемещения поршня гидроцилиндра может быть подсчитана по формуле

$$g = \frac{L}{t} \quad \text{м/с} \quad (10.1)$$

где L – длина хода поршня, м;

t – время перемещения на длину L , с.

КПД гидропривода η может быть подсчитан по формуле:

$$\eta = \frac{N_{\Gamma}}{N}, \quad (10.2)$$

где N_{Γ} – выходная мощность гидропривода, т.е. мощность, развиваемая гидроцилиндром;

N – мощность, подводимая к гидроприводу, т.е. мощность, потребляемая насосом (мощность насоса).

Мощность N_{Γ} подсчитывается по формуле:

$$N_{\Gamma} = \frac{PFg}{102}, \quad \text{кВт} \quad (10.3)$$

где P – давление в нагрузочном гидроцилиндре;

F – площадь штоковой полости нагрузочного гидроцилиндра, см²;

g – скорость перемещения поршня гидроцилиндра, м/с.

Мощность N подсчитывают по формуле:

$$N = N_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{э}}$$

где $N_{\text{э}}$ – мощность, потребляемая приводным электродвигателем, кВт;

$\eta_{\text{э}}$ – КПД электродвигателя.

10.3 Опытная установка

Подача рабочей жидкости из основного гидробака 6 в гидросистему осуществляется насосом 1 (см. рисунок 10). Давление на выходе из насоса 1 устанавливается переливным клапаном и контролируется по манометру 4, включенному через кран 4 (5).

Привод насоса 1 осуществляется электродвигателем. Мощность, потребляемая из электросети электродвигателем, определяется по ваттметру.

В зависимости от положения кранов могут быть получены схемы гидроприводов с регулятором потока, установленным на выходе в гидродвигатель, с регулятором потока 3, установленным на выходе из гидродвигателя и с регулятором потока 3, установленным на ответвлении по напорной гидролинии. Кран при всех этих испытанных остается открытым.

Таблица 10.1

Результаты измерений и обработки опытных данных

№ опыт	Движения гидроцилиндра	Измеренные величины				Расчетные величины		
		L, м	t, с	P, кгс/см ²	N, кВт	g, м/с	N, кВт	η, %
1								
2								
3								
4								

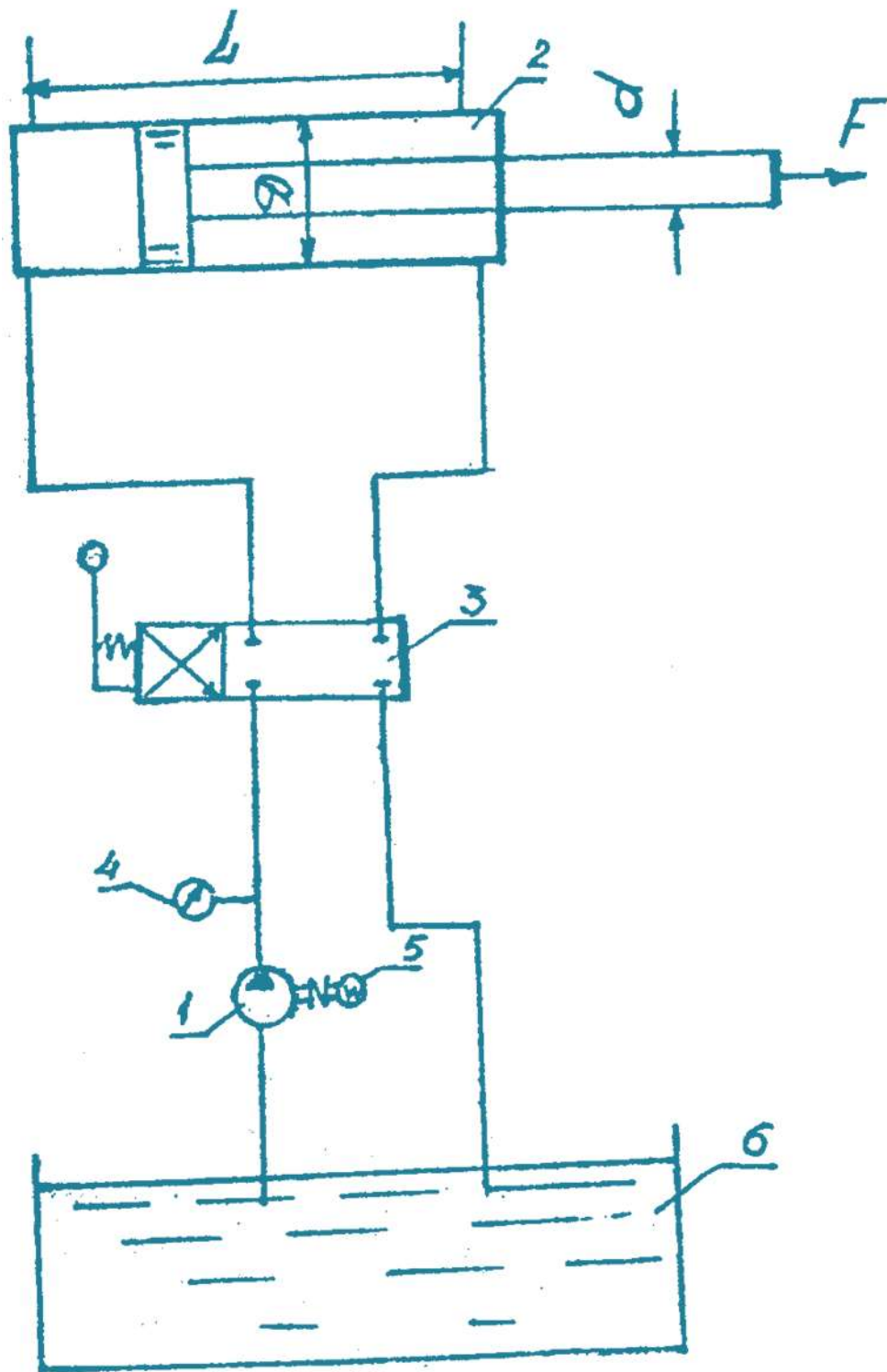


Рис.10. Схема опытной установки: 1 – насос; 2 – гидроцилиндр; 3 - гидрораспределитель; 4 – манометр; 5 – электродвигатель; 6 – гидробак.

10.4 Порядок проведения опытов

Перед включением приводного электродвигателя следует записать в отчет температуру масла в гидробаке измеряемую термометром; убедится, что кран 4(4) открыт и нагрузочной дроссель 2 поставить в положение для случая включения регулятора потока» на входе».

Затем следует включить приводной электродвигатель при указанных в таблице положениях регулятора потока произвести испытания гидропровода. С помощью направляющего гидрораспределителя 3 нужно осуществить несколько рабочих и холостых ходов гидроцилиндра 2.

Измерений указанных в таблице 10.1 параметров следует производить при рабочем ходе гидроцилиндров 6 и 7(при ходе вверх): при этом измеряются давление p , мощность $N_{эл}$ и время t . Эти измерения производятся для всех указанных в таблице 10.1 положений регулятора потока.

Закончив испытания гидропривода с регулятором потока, включенным на входе, следует выключить приводной электродвигатель и установить краны в положение, соответствующее включение регулятора потока на выходе, после чего включить электродвигатель и произвести необходимые измерения при указанных в таблице 10.1 положениях регулятора потока.

10.5 Вопросы к защите лабораторной работы.

1. Как влияет число зубьев шестеренного насоса на его подачу?
2. Как можно регулировать подачу объемного гидропривода?
3. Как вычисляют подачу объемного гидропривода?
4. Недостатки объемных гидроприводов?

11. ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРИНЦИП РАБОТЫ СТРУЙНОГО НАСОСА

11.1 Цель работы

Целью работы является демонстрация принцип работы струйного насоса. Построение напорной характеристики насоса.

11.2. Общие сведения

Согласно современным определениям, струйным насосом называется динамический насос трения, в котором поток перекачиваемой жидкости перемещается благодаря механическому воздействию на него другого (рабочего) потока той или иной жидкости, обладающей большой удельной кинетической энергии. В практике существуют следующие виды струйных насосов: эжекторы, инжекторы и гидроэлеваторы.

Эжектор - рабочий и перекачиваемый оба потока являются потоками одной и той же жидкости.

Инжектор - рабочим потоком служит поток пара и газа, а перекачиваемый поток той или иной жидкости.

Гидроэлеватор - рабочим является поток воды, а перекачивается гидросмесь (пульпа).

Достоинство струйных насосов:

- обходится без двигателей:
- работают с загрязненными и агрессивными жидкостями:
- простота конструкции:

Недостаток:

- низкий к.п.д. ($\eta_{\max} = 0,2 \dots 0,35$)

Основные параметры струйного насоса (рис.11)

Напор:

а) рабочий

$$H_p = \frac{P}{\rho g} + \frac{g_B^2}{2g} + \frac{P_3}{\rho g} - \frac{g_3^2}{2g}, \quad (11.1)$$

б) полезный

$$H_{\Pi} = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{g_3^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho_2 g} - \frac{g_1^2}{2g} \quad (11.2)$$

в) относительный

$$\nabla h = \frac{H_{\Pi}}{H_{\Pi} + H_p} \quad (11.3)$$

Относительная подача насоса

$$q = \frac{Q_2}{Q_1}; \quad (11.4)$$

Q_1 -расход рабочей жидкости:

Q_2 -расход перекачиваемой жидкости;

КПД струйного насоса

$$\eta = \frac{H_{\Pi} \cdot Q_2}{H_v \cdot Q_1} \quad (11.5)$$

В предлагаемой лабораторной установке, основной целью является демонстрация принципа работа струйного насоса, т.е используя уравнение Бернулли, показать, что поток перекачиваемой жидкости перемещается благодаря механическому воздействию на него другого потока жидкости, обладающей большей уделенной кинетической энергии.

Камера смещения является основным элементом струйного насоса, где происходит преобразования, энергии жидкости. Здесь в качестве камеры смещения (B) можно рассмотреть насадку (6) вместо с подводящей трубкой (7).

Одним из основных характеристик струйного насоса является относительная подача насоса, т.е. соотношение расходов самого потока (рабочего) и всасываемого потока.

Составляем уравнение Бернулли для сечений 1-1и2-2, а также для сечений 4-4 и 2-2.

Плоскость сравнения, проводим через сечения 2-2, тогда для сечений 1-1 и 2-2.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 g_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 g_{21}^2}{2g} + \xi_1 \frac{g_{21}^2}{2g} \quad (11.6)$$

для сечений 4-4 и 2-2

$$Z_4 + \frac{P_4}{\gamma} + \frac{g_4^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 g_{24}^2}{2g} + \xi_4 \frac{g_{24}^2}{2g} \quad (11.7)$$

где $Z_1=H$ – напор в резервуаре;

$P_1=P_a$ – атмосферное давление;

$g_1=0$ – скорость в сечении 1-1;

$Z_2=0, P_2=P_c$ – давление в камере смещения;

g_2 - скорость рабочего потока, $g_2 = \frac{Q_1}{\omega_1}$;

ξ_1 - коэффициент сопротивления системы;

$Z_4=-h$;

$P_4=P_1+\gamma H + \gamma h$;

g_{24} - скорость всасываемого потока; $g_{24} = \frac{Q_2}{\omega_2}$;

ξ_4 - коэффициент сопротивления патрубки.

Поставляя значения параметров в уравнении (11.6) и (11.7), после некоторых преобразований имеем:

$$\frac{g_{21}^2}{g_{24}^2} = \frac{(1 - \xi_1)}{(1 - \xi_4)};$$

Отсюда переходя

$$\frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \left(\frac{1 + \xi_1}{1 + \xi_4} \right);$$

Тогда соотношения расходов в камере смещения

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \sqrt{\frac{1 + \xi_1}{1 + \xi_4}}; \quad (11.8)$$

В случае когда сечения

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \sqrt{\frac{1 + \xi_1}{1 + \xi_4}}; \quad (11.9)$$

11.3 Опытная установка

Установка для демонстрации работы струйного насоса состоит из резервуара подводящего трубопровода 1 с задвижкой в трубопроводе рабочей жидкости; 2-активное сопло; 3-трубопровод подачи воды; 4-приемная камера; 5-камера смешения потоков; 6- диффузор; 7-гайка; 8-резьбовой участок для соединения рабочего трубопровода с рабочей части струйного насоса.

Измерительная часть установки включает уровнемер для измерения уровня жидкости, мерный резервуар с вентилем и струенаправляющим устройством (ПАТЕНТ №FAP 00733 Установка разработана сотрудниками кафедры «Гидравлика и гидроинформатика» и «Ирригации и мелиорации», НИУ «ТИИИМСХ»)

Для приведенной расчетной схемы струйного водоподъемника (рис. 11.1) рабочий напор определен как разность напоров во входных (1-1) и выходных (2-2) сечениях водоподъемника по формуле (11.2).

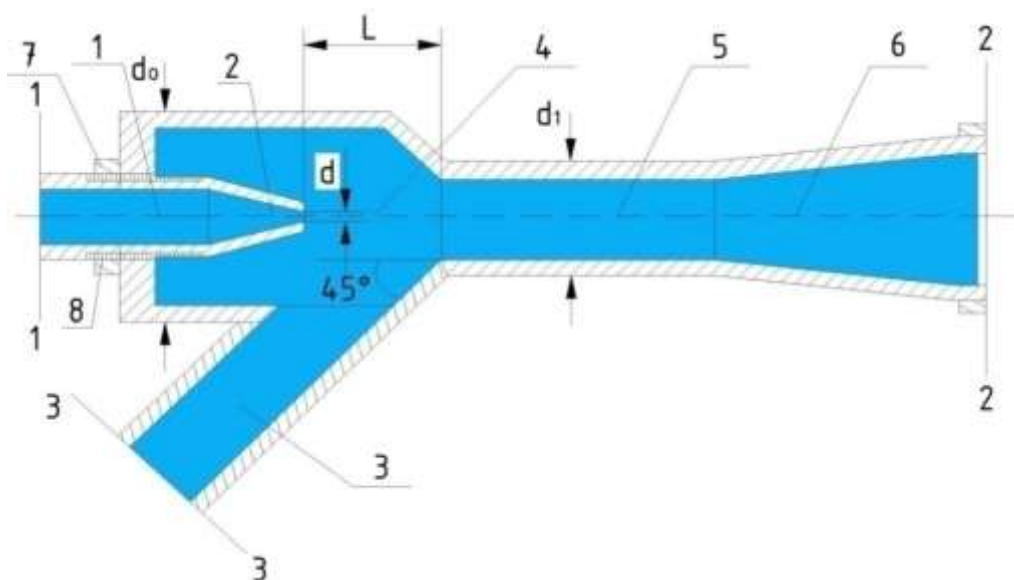


Рис.11.1. Схема струйного водоподъемника.

1-трубопровод рабочей жидкости; 2-активное сопло; 3-трубопровод подачи воды; 4-приемная камера; 5-камера смешения потоков; 6- диффузор; 7- гайка; 8-резьбовой участок

11.4 Порядок проведения опытов

Установка приводится к виду истечения жидкости из насадка. Струйный насос монтируется к системе трубопроводов. Открывается вентиль (В1), заполняется бак до определенного уровня. Уровень воды в баке измеряется при помощи уровнемера. Давление в трубопроводах измеряется манометрами.

Объёмным способом или с помощи водомерной установки измеряется расход подаваемый в резервуар. По линейки установленной в мензурке, определяется расход перекачиваемой жидкости.

Таким образом опыты повторяется 4-5 раз при различных значениях напора – Н.

№ по/п	Наименования величин	Ед. изм	Номера опытов					
1	Диаметр мензурки							
2	Напор – Н							
3	Напор – Н ₁							
4	Показание водомерной установки - h _p							
5	Расход – Q ₁							
6	Расход – Q ₂							
7	Относительная подача – q							
8	Относительный напор – h							

11.5.Обработка опытных данных и их анализ

На основе измеренных данных определяется относительный напор.

По результатам расчета строится график $q=f(h)$;

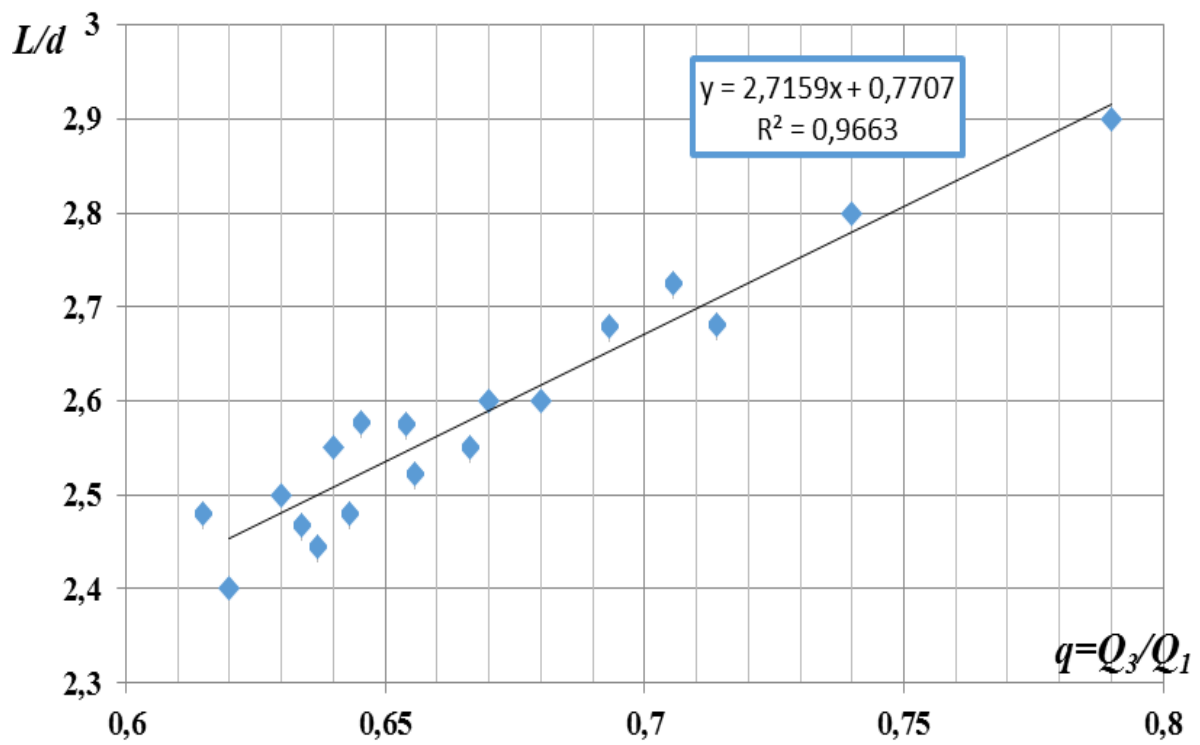


Рис.11.2. Определение режима работы струйного водоподъемника

11.6 Вопросы к защите лабораторной работы

1. Кратко опишите принцип работы струйного насоса.
2. Начертите схему, характеризующую смещение потоков.
3. Опишите характеристику струйного насоса. Что выражает коэффициент расхода?
4. В чём причина возникновения вакуума в насадках?

12. ТАРИРОВКА ВОДОМЕРНОЙ УСТАНОВКИ

12.1 Цель работы

Целью работы является изучение работы водомерной установке в напорных трубопроводах. Развитие навыков измерений и расчета объема жидкости.

12.2 Общие сведения

Существуют множество методов измерения расхода жидкости: гидрометрические, гидравлические, гидравлико-гидрометрические, физические и др.

Гидравлические методы включают замеры расходов с помощью сужающих устройств. В напорных трубопроводах эти диафрагмы, сопри, трубка Вентури и др. Использование перечисленных устройств базируется на уравнение Бернулли.

Составляем уравнение Бернулли для сечений.1-1 и 2-2

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{g_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{g_2^2}{2g} + h_f \quad (12.1)$$

$$\omega_1 g_1 = \omega_2 g_2; \quad g_1 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) g_2$$

Подставляя значение параметров входящих в уравнению (2.1), т.е.

$$Z_1 = 0; \quad Z_2 = 0; \quad h = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma}; \quad h_f = \frac{g_2^2}{2g}$$

принимая $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$

имеем

$$h = \frac{g_2^2}{2g} - \frac{g_2^2}{2g} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + h_f$$

отсюда, определяем - g_2 :

$$g_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \xi}},$$

и переходя к расходу

$$Q = \omega_2 g_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \xi}} \cdot \sqrt{h}$$

$$Q = C\sqrt{h} \tag{12.2}$$

где C - величина, постоянная для данного расходомера;

Значения C – можно определить теоретически, но экспериментальное определение более удобное.

Формула (12.2) пригодна и для автоматизации расхода в данном трубопроводе. Это можно осуществить построением графика $Q=f(h)$.

12.3 Опытная установка

1. Объемным способом определяется расход жидкости при различных значениях разности пьезометром (h).

2. Определение значения C - постоянной водомера.
3. На основе полученных результатов строится график $Q=f(h)$.
4. Производится статистическая обработка полученных результатов.

12.4 Порядок проведения опытов

Открывается вентиль – 1(В1) в напором трубопроводе. После установке уровня воды в пьезометрах (П1 и П2) по ним берется отсчет и вычисляется разность. Измеряется фактический расход объемным способом ($Q = \frac{W}{t}$, W – объем мерного бака). Изменения 5-6 раз открытые вентилля, т.е. измерения расход и повторяя при каждом открытые все последующие измерений, получаем значение C - постоянная водомера по формуле (12.2).

Результаты измерений сводятся в таблицу 12.1 и по данным графы (2) и (5) строится график.

Таблица 12.1.

Результаты измерений

№ по/п	Наименования величин		Номера опытов					
1	Показание пьезометра	$\frac{P_1}{\gamma}, \frac{P_2}{\gamma}$						
2	Разность уровня в пьезометре	$h, \text{ см}$						
3	Объем воды	$W, \text{ см}^3$						
4	Продолжительность заполнения мерного сосуда	$t, \text{ с}$						
5	Расход	Q						
6	Постоянная водомера	C						

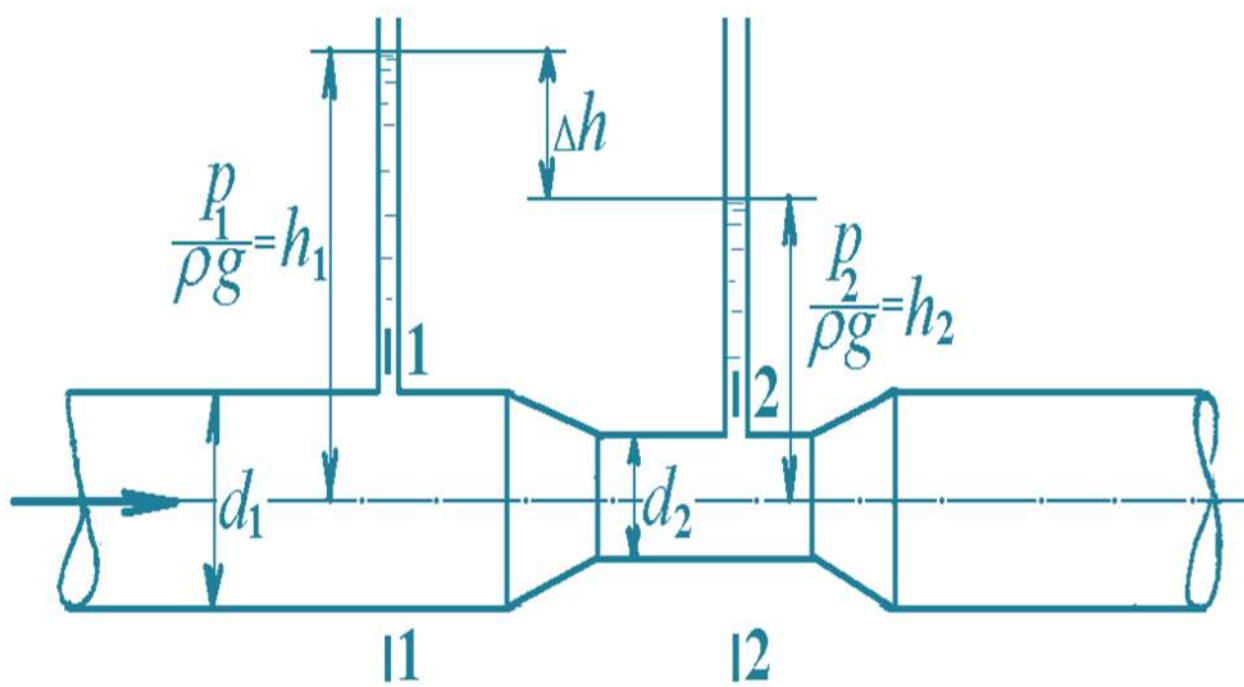


Рис.12 Схема лабораторной установки

12.5. Обработка опытных данных и их анализ

По показаниям пьезометра определяется – h . Определяется расход воды по формуле $Q = \frac{W}{t}$.

По данным таблицы строится график $Q=f(h)$.

12.6 Оценка полученных результатов

Оценка полученных результатов проводится по методике приведенной в главе 1. Вычисляются границы доверительного интервала и производится оценка точности измерений.

12.7 Вопросы к защите лабораторной работы

1. От чего зависит теоретическая расход жидкости.
2. Что выражает коэффициент расход?
3. Почему насадка используется в качестве расходомерного устройства?
4. Запишите и расшифруйте формулу для определения расхода в водомерной установке.

13. ИСЛЕДОВАНИЕ СИФОННЫХ ВОДОИЗМЕРИТЕЛЕЙ В ОРОШАЕМОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

13.1 Цель работы

Целью работы является изучение работы **сифонных водоизмерителей в орошаемом земледелии**. Развитие навыков измерений и расчета объема жидкости.

13.2 Общие сведения

В орошаемом земледелии используются множество водоподъемников и водоизмерителей различных конструкций.

Приведенные исследования, по созданию сифонных устройств водоподдачи в орошаемом земледелии являются основой усовершенствования забора воды из лотков.

При использовании в орошаемом земледелии местных и зарубежных водоизмерительных устройств существуют известные трудности. Причина этого низкая точность измерения, необеспеченность водоизмерительных устройств электричеством, их дороговизна. На основе проводимых в водном хозяйстве преобразований в организации рационального и целенаправленного использования водных ресурсов, в первую очередь в АВП и территориях фермерских хозяйств, управление, распределение водой и, если нужно, оборудование расчетными устройствами, во вторых необходимы исследования, с точки зрения разработка точных рекомендаций в организации измерительно–наблюдательных работ по современным устройствам. В настоящее время ставится ряд требований на водоизмерительные устройства, в том числе, требуется разработка водоизмерительных устройств с высокой точностью и достоверностью в различных условиях работы без внешнего воздействия, требуется возможность постоянного и оперативного контроля.

В улучшении забора воды из лотков, в целях уменьшения потерь воды, можно воспользоваться сифонами, имеющими различные гидравлические элементы. В настоящее время наблюдаются примитивные случаи забора воды из лотков через повреждения их конструктивных элементов, что не позволяет вести точный учёт воды. Устранение этих недостатков можно за счёт усовершенствования заборных устройств и при их помощи достижение расчетных расходов воды. В лаборатории, в проведенных исследованиях на лотках по определению оптимальных параметров сифонных трубопроводов создана новая конструкция сифонного трубопровода и усовершенствована методика его расчёта.

Гидравлический расчет сифона выполняется по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2gh};$$

Здесь μ - коэффициент расхода сифона:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{сис}}}};$$

$\xi_{\text{сис}}$ - суммарная коэффициент сопротивления сифонного трубопровода.

13.3 Опытная установка

Опытная установка переносного сифона-водоизмерителя для забора воды из лотков разработана сотрудниками кафедры «Гидравлика и гидроинформатика» и «Ирригации и мелиорации», НИУ «ТГИИМСХ (Патент UZ FAR 01218).

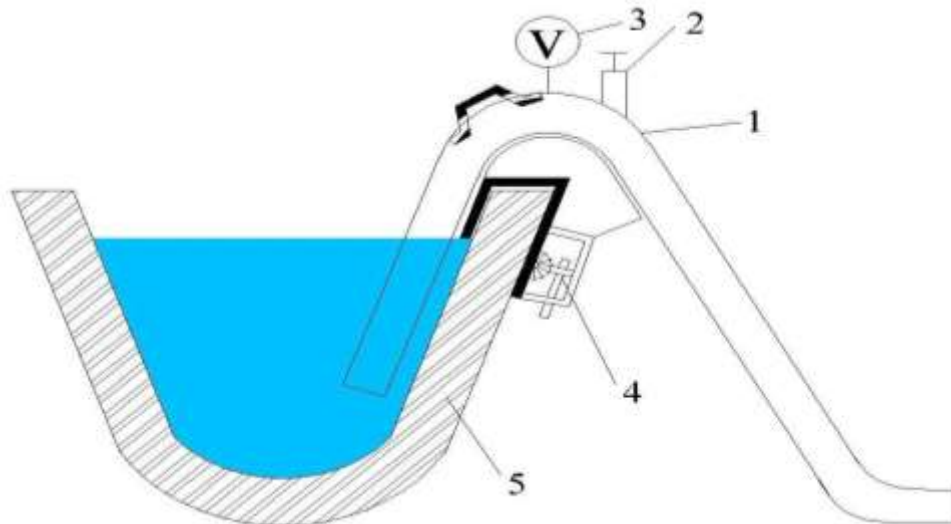


Рис.13.2. Переносной сифон водоизмеритель

1-сифон ; 2-патрубок для зарядки сифона; 3-вакуумметр; 4-винт; 5-лоток.

При помощи сифонного трубопровода вместе с забором воды с целью определения точного расхода воды в его верхнюю часть устанавливается вакуумметр, зависимость расхода от показания вакуумметра показана на графике $Q = f(P)$. (рис.13.3). Вместе с этим устройство является переносным, существует возможность установления в любых местах забора. Воды и точного его распределения соответственно спроса водопотребителей.

13.4 Порядок проведения опытов

1. Объемным способом определяется расход жидкости при различных значениях показания мановакуумметра.
2. Определение значения C - постоянной водомера.
3. На основе полученных результатов строиться график $Q=f(P)$.
4. Производится статистическая обработка полученных результатов

(Рис13.2.

13.5.Обработка опытных данных и их анализ

По показаниям мановакуумметра $P - h$. Определяется расход воды по формуле $Q = \frac{W}{t}$.

По данным таблицы строится график $Q=f(P-h)$.

Таблица 13.1 Результаты расчета и измерений

d, м	ω, м²	v, м/с	Re	λ	$\xi_{\text{сис}}$	μ	Q, л/с

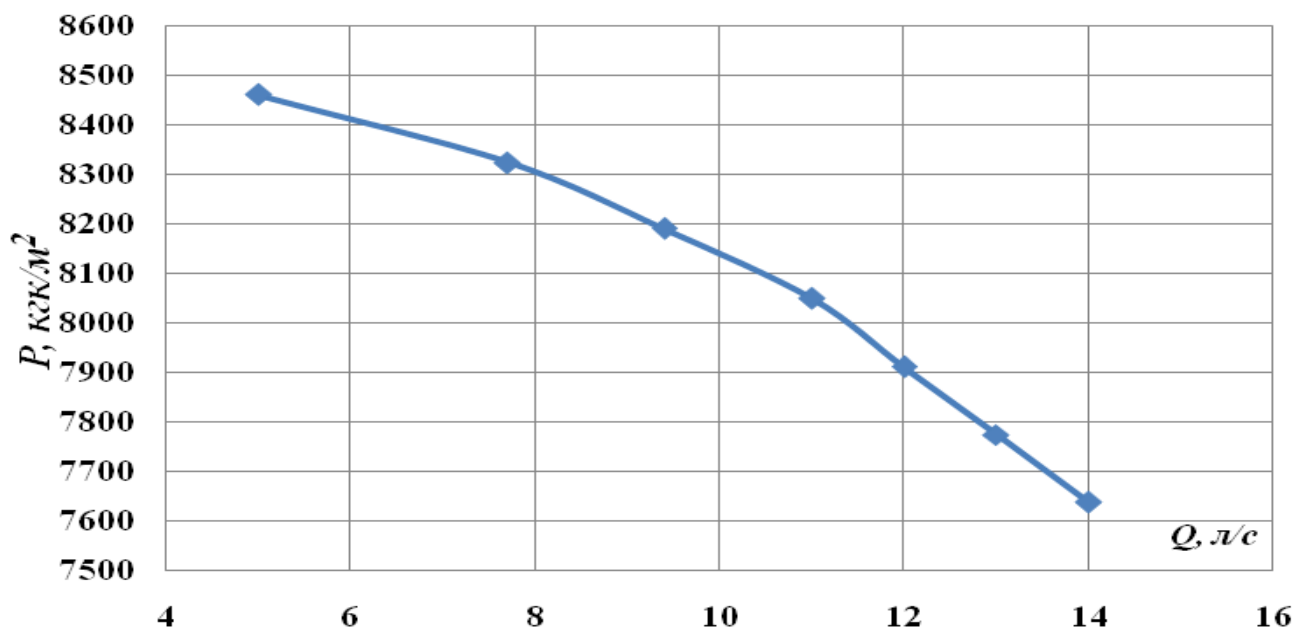


Рис. 13.3. График для определения расхода воды $Q = f(P)$

13.6 Оценка полученных результатов

Оценка полученных результатов проводится по методике приведенной в главе 14. Вычисляются границы доверительного интервала и производится оценка точности измерений.

13.7 Вопросы к защите лабораторной работы

1. Как определяется расход жидкости в коротких трубопроводах.
2. Опишите основные элементы сифонного водоизмерителя.
3. Опишите принцип работы измерительных приборов на установке сифонного трубопровода.
4. Запишите и расшифруйте формулу для определения расхода в водомерной установке.

14. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Основные сведения. Гидравлические измерения предусматривают измерение таких физических величин, как масса, давление, скорость и расход жидкости. Эти измерения необходимы для определения других физических величин, характеризующих гидравлические процессы: коэффициентов вязкости, фильтрации, местных сопротивлений, гидравлического трения и др.

Измерения гидравлических величин широко используются с целью контроля за технологическими процессами, обеспечения надежности работы оборудования и повышения его экономичности. Они применяются при эксплуатации и наладке систем водоснабжения, канализации, мелиорации, гидропривода и т. д.

Измерением называется совокупность действий, выполняемых при помощи средств измерения с целью нахождения числового значения измеряемой величины в принятых единицах измерения. Измерение представляет собой сравнение величины с другой однородной величиной, принимаемой за единицу измерения.

Результаты измерения размерных величин выражаются числовыми значениями с указанием обозначения использованных единиц. Например, давление в месте измерения составляет 100 Па. Это означает, что измеряемое давление в 100 раз больше по сравнению с единицей давления, равной 1 Па.

Для безразмерных величин результаты измерения характеризуются одними числовыми значениями. Безразмерные относительные величины часто выражаются в процентах (%) и промилле (‰). Промилле—тысячная доля размера физической величины. Например, уклон дна канала составляет 0,003, т. е. 0,3%, или 3‰.

По способу получения числового значения измеряемой величины различают прямые и косвенные измерения.

Прямыми измерениями называются такие, при которых измеряемая величина отсчитывается в соответствующих единицах непосредственно по шкале.

Таким образом выполняются измерения температуры термометром, давления механическим манометром, времени секундомером и т. д.

При *косвенных измерениях* искомое числовое значение определяется на основании известной функциональной зависимости между измеряемой величиной и величинами, числовые значения которых могут быть получены с помощью прямых измерений. Косвенные измерения — это, например, измерения площади прямоугольника по его сторонам, плотности тела по его массе и геометрическим размерам, мощности электронагревателя по напряжению и силе тока, расхода жидкости по перепаду давления и геометрическим размерам сужающего устройства и т. д.

Измерение любой физической величины, как бы тщательно оно ни производилось, не позволяет получить ее истинное значение. Отклонения результатов измерения от истинного значения объясняются несовершенством применяемых методов и средств, изменениями измеряемой величины и условий измерения, индивидуальными особенностями экспериментатора.

В зависимости от источников возникновения отклонений различают:

инструментальные погрешности, обусловленные применяемыми средствами измерения;

методические погрешности, характеризующие используемый метод измерения;

субъективные погрешности, вносимые экспериментатором (например, при отсчете по шкале прибора).

При измерении определяется не истинное (точное) значение, а лишь приближенное. При любом уровне развития техники измерений всегда присутствуют неустранимые, неизбежные отклонения от истинного значения измеряемой величины.

Истинным называется такое значение физической величины, которое идеально отражает в количественном и качественном отношениях соответствующее свойство физического объекта. Истинное значение физической величины найти невозможно, поэтому вместо него используется приближаю-

щееся к истинному действительное значение, которое находится экспериментальным путем.

За действительное значение измеряемой величины принимаются: при однократном измерении — результат этого измерения x , при многократных измерениях — среднее арифметическое \bar{x} из результатов отдельных измерений (наблюдений) :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14.1)$$

Где: n — число измерений при неизменных условиях опыта;
 x_i — результат отдельного измерения.

Таким образом,

$$A = x \quad \text{или} \quad A = \bar{x} \quad (14.2)$$

Погрешностью называется отклонение измеренного значения величины от ее истинного значения. Для количественной оценки используются абсолютные и относительные погрешности.

Абсолютная погрешность — разность между измеренным и истинным значениями измеряемой величины:

$$\Delta_x = x - A \quad (14.3)$$

где Δ_x — абсолютная погрешность данного измерения.

Абсолютная погрешность имеет такую же размерность, как и измеряемая величина.

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{A} \quad 14.4$$

Относительная погрешность является безразмерной величиной, часто ее выражают в процентах.

Числа, характеризующие измеряемую величину и погрешность, всегда являются приближенными. Поэтому их необходимо округлять в соответствии с правилами.

В зависимости от вида математической связи с измеряемой величиной различают систематические, случайные и грубые погрешности.

Систематическими называют погрешности, которые имеют однозначную функциональную зависимость от измеряемой величины или остаются постоянными при любом ее значении. Систематическая погрешность не изменяется при повторных измерениях одной и той же величины одними и теми же средствами измерения.

Источником систематических погрешностей являются в основном инструментальные и методические погрешности. Они могут быть вызваны неисправностью прибора, неправильной его установкой, несовершенством метода измерения. Систематические погрешности могут быть устранены путем совершенствования методики измерения или введением поправок.

Поправкой называется значение одноименной с измеряемой величины, алгебраически суммируемое с результатами измерения для исключения систематической погрешности. Например, если при взвешивании одна из гирь имеет массу меньше номинальной, то результат измерения любой массы будет всегда больше истинного значения на величину систематической погрешности. В результаты измерения следует ввести поправку, равную разности номинальной и истинной массы дефектной гири.

При измерении давления жидкости манометром, смещенным по вертикали от точки измерения, возникает систематическая погрешность. Она может быть определена по основному уравнению гидростатики и введена в виде поправки в результаты измерения.

В рассмотренных случаях систематическая абсолютная погрешность остается постоянной при любых показаниях прибора, а соответствующая относительная погрешность уменьшается с увеличением измеряемой величины.

Если время измеряется с помощью секундомера, который равномерно отстаёт (или спешит), то систематическая абсолютная погрешность увеличивается пропорционально времени измерения, а относительная погрешность остается постоянной.

Прежде чем приступать к измерениям, необходимо выявить причины возможных систематических погрешностей, установить закономерность их появления и разработать методику введения поправок в результаты измерения.

Одним из способов исключения систематических погрешностей является использование только тех приборов, которые имеют свидетельство о государственной поверке. В соответствии с ГОСТ 8.002—71 предусматривается обязательная периодическая поверка всех средств измерения, за исключением учебных.

Случайными погрешностями называются те значения, которые определяются законами математической статистики и теории вероятностей. Об их присутствии свидетельствуют различные числовые значения измеряемой величины при повторных измерениях в одних и тех же условиях. Случайные погрешности обусловлены влиянием на результат измерения неконтролируемых факторов, которые не могут быть установлены в процессе измерения. Поэтому случайные погрешности не могут быть исключены из результата измерения, а только с определенной вероятностью могут быть оценены их значения.

Случайные погрешности вызываются неточностью отсчета по шкале прибора, наличием люфта в подшипниках прибора, трением его движущихся деталей, изменениями в условиях измерения и т. д.

Погрешности отсчета возникают за счет параллакса и за счет округления. Параллаксом (отклонением) называют видимое изменение относительных положений предметов вследствие перемещения глаза наблюдателя. Для устранения его влияния необходимо, чтобы прямая, проходящая через зрачок глаза и стрелку прибора, была перпендикулярна к его шкале.

Установлено, что даже опытные наблюдатели ошибаются при отсчетах не менее чем на 0,2 деления шкалы. Поэтому для повышения точности отсчета применяются зеркальные шкалы, нониусы, а также отсчет через увеличительную линзу. Однако во многих случаях оказывается нецелесообраз-

ным оценивать на глаз доли деления шкалы и следует производить отсчет с округлением до ближайшего деления шкалы.

Грубыми погрешностями (промахами) принято называть погрешности, которые появляются в результате неверного отсчета, резкого изменения условий опыта, при неисправности средств измерения и т. д. Грубые погрешности существенно отличаются от ожидаемого значения погрешностей. Результаты измерения, содержащие грубые погрешности, исключаются из рассмотрения как явно неточные и незаслуживающие доверия.

Для оценки случайных погрешностей используется теория вероятностей, в которой случайные величины характеризуются относительной частотой и вероятностью появления данного значения случайной величины.

Относительной частотой появления данного значения называется отношение числа наблюдений, в которых было получено это значение случайной величины, к общему числу наблюдений (измерений).

Вероятностью появления рассматриваемого значения называется предел, к которому стремится относительная частота при бесконечно большом числе наблюдений.

Случайные погрешности являются непрерывными случайными величинами, так как они могут принимать любое числовое значение в рассматриваемом интервале (например в пределе от $-\infty$ до $+\infty$)

Вероятность появления определенного числового значения случайной погрешности является бесконечно малой, стремящейся в пределе к нулю. Поэтому при анализе непрерывных случайных величин определяется вероятность появления величины в заданном (рассматриваемом) интервале ее значений.

Особенности распределения непрерывных случайных величин учитываются отношением вероятности их появления к интервалу рассматриваемых значений. Предел этого отношения, когда интервал значения величины стремится к нулю, называется плотностью распределения вероятностей. В соот-

ветствии с этим вероятность появления случайной величины в интервале ее значений от x_1 до x_2 определяется по формуле

$$p = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad 14.4$$

где $f(x)$ — плотность распределения вероятностей.

При характеристике случайных погрешностей обычно требуется определить пределы (границы) интервала ее значения при принятой (требуемой) вероятности появления величины в этом интервале. Интервал и вероятность в этих случаях называются доверительными.

Доверительный интервал, характеризующий степень воспроизводимости результатов измерений и значение самой погрешности, может иметь различные значения в зависимости от доверительной вероятности.

Соотношение между доверительными интервалами и вероятностями устанавливается уравнением (14.4), в котором необходимо знать вид функции, характеризующей плотность распределения величины и представляющей собой закон распределения случайной величины.

Для большинства измерений имеет место нормальный закон распределения случайных погрешностей. График нормального распределения имеет симметричную колоколообразную форму с одним максимальным значением. При удалении от вершины вправо или влево наблюдается непрерывное уменьшение плотности распределения, асимптотически приближающейся к нулю.

Числовые значения интеграла от плотности распределения величины при нормальном законе распределения определяются по таблицам, приводимым в литературе по теории вероятностей и математической статистике.

Некоторые виды погрешностей, например округления и отсчета, характеризуются прямоугольным распределением (названо по форме графика). Максимальная погрешность в этом случае ограничена, а плотность вероятности во всем интервале погрешностей одинакова.

Параметры, характеризующие закон нормального распределения погрешностей, среднее арифметическое значение измеряемой величины, среднее квадратическое отклонение, а также зависящие от них доверительные интервал и вероятность, могут быть определены только приближенно, так как для точного определения необходимо сделать бесконечное число измерений.

Таблица 14.1. Коэффициенты Стьюдента

Число измерений	Доверительная вероятность			
	0,9 0	0,95	0,99	0,997
2	6,31	12,71	63,66	234,8
3	2,92	4,303	9,925	19,2
4	2,35	3,182	5,841	9,2
5	2,13	2,776	4,604	6,6
6	2,02	2,571	4,032	5,5
7	1,94	2,447	3,707	4,9
8	1,90	2,365	3,499	4,5
9	1,86	2,306	3,355	4,3
10	1,83	2,262	3,250	4,1
12	1,80	2,20	3,11	3,8
14	1,77	2,16	3,01	3,7
16	1,75	2,13	2,95	3,6
18	1,74	2,11	2,90	3,5
20	1,73	2,09	2,86	3,4
50	1,68	2,01	2,68	3,2
100	1,66	1,98	2,63	3,1

Указанные параметры в свою очередь также являются случайными величинами.

Закон распределения случайных погрешностей при ограниченном числе измерений был установлен Стьюдентом (псевдоним английского математика В. Госсета). Кривые распределения Стьюдента более пологие, чем кривые нормального распределения. Это объясняется тем, что при малом числе измерений увеличивается вероятность появления больших погрешностей и со-

ответственно уменьшается вероятность появления малых погрешностей. При большом числе измерений (превышающем 200) распределение Стьюдента совпадает с нормальным распределением.

Границы доверительного интервала (максимальная случайная погрешность) по Стьюденту находят по формуле

$$\varepsilon = t \cdot \sigma, \quad (14.5)$$

где t — коэффициент Стьюдента, определяемый по табл. 14.1 в зависимости от числа измерений и доверительной вероятности; σ — среднее квадратическое отклонение, определяемое для среднего арифметического результата измерения ($\sigma_{\bar{x}}$) по формуле (14.6) и для результата отдельного измерения (σ_i) — по формуле (14.7)

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad 14.6$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad 14.7$$

где n — число измерений.

При определении границ доверительного интервала случайных погрешностей рекомендуется принимать доверительную вероятность равной 0,95. В тех случаях, когда измерение нельзя повторить, следует принимать доверительную вероятность равной 0,99. В особых случаях, когда результаты измерения имеют, например, значение для обеспечения здоровья людей, допускается использовать более высокие доверительные вероятности.

Измерения в условиях учебного эксперимента проводятся при доверительной вероятности 0,9 или 0,95.

Анализ уравнений (14.5), (14.6) и (14.7) позволяет заключить, что увеличение числа измерений приводит к уменьшению границ доверительного интервала и уменьшению случайной погрешности. При этом уменьшение слу-

чайной погрешности происходит прямо пропорционально корню квадратному из числа измерений. Для увеличения точности измерения в два раза необходимо увеличить число измерений в четыре раза.

Изложенный вывод о возможности уменьшения погрешностей путем увеличения числа измерений характеризует особенности случайных погрешностей. Другим способом их уменьшения и повышения точности измерений является применение более точных методов и средств измерения.

Следует также отметить, что случайные погрешности всегда присутствуют при измерениях. Если же при повторении измерений получаются одинаковые величины и результат измерения не изменяется, то это свидетельствует о недостаточной точности средств и метода измерения, но не об отсутствии случайных погрешностей.

Систематические погрешности в этом случае значительно превышают случайные погрешности.

При анализе случайных погрешностей важное значение имеет обоснованное исключение грубых погрешностей. Принятие решения об исключении или учете резко отличающихся от других результатов измерений должно производиться на основании методов, рассматриваемых в математической статистике.

На практике часто используют простой прием, состоящий в исключении из рассмотрения результата измерения, абсолютная погрешность которого превышает удвоенное или утроенное среднее квадратическое отклонение результата отдельного измерения. Выбор максимально допускаемой погрешности определяется в зависимости от числа измерений и доверительной вероятности.

При выявлении промаха:

а) вычисляется вспомогательная величина

$$g = \frac{|x_n - \bar{x}|}{\sqrt{n-1} \cdot \sigma_x}$$

где x_n — наибольшее или наименьшее значение из полученных результатов измерения при постоянных условиях опыта;

б) по табл. 14.2 в зависимости от заданной доверительной вероятности p находится ϑ_{\max} и сравнивается с вычисленным по формуле (14.7);

в) если $\vartheta > \vartheta_{\max}$, то полученный результат является промахом и его надо исключить из результатов измерения.

Систематические погрешности прямых измерений являются инструментальными, методическими и субъективными. Они подразделяются на две группы.

Таблица 14.2. Значение ϑ_{\max}

p/n	0,90	0,95	0,99	p/n	0,9	0,95	0,99
3	1,41	1,41	1,41	9	2,10	2,24	2,46
4	1,64	1,69	1,72	10	2,15	2,29	2,54
5	1,79	1,87	1,96	12	2,23	2,39	2,66
6	1,89	2,0	2,13	14	2,30	2,46	2,76
7	1,97	2,09	2,26	16	2,35	2,52	2,84
8	2,04	2,17	2,37	18	2,40	2,58	2,90

В первую из них входят систематические погрешности, для которых известны не только природа и причины появления, но и их величина. Такие погрешности исключаются из рассмотрения путем введения поправок в результаты измерения.

Систематические погрешности, составляющие вторую группу, имеют ту особенность, что ввиду их малости не удастся установить имеющуюся закономерность их проявления. Такие погрешности называются неисключенными систематическими. Их оценивают приближенно, рассматривая как случайные величины при прямоугольном (равномерном) распределении. Поэтому неисключенные систематические погрешности иногда называются случайными составляющими систематических погрешностей.

Инструментальные погрешности зависят от применяемых средств измерения. Для их исключения или уменьшения используются регулярная поверка, правильная установка нуля отсчета, правильное расположение приборов, их эксплуатация в допускаемом диапазоне влияющих факторов: давления, температуры, влажности, запыленности и т. д. При поверке образцовых средств измерения устанавливаются поправки, которые вводятся в результат измерения.

Инструментальные погрешности технических (промышленных) средств измерения, используемых на производстве и во многих случаях в лабораториях, представляют собой неисключенные систематические погрешности. Технические средства измерения не снабжаются поправками по результатам их поверок.

Границы интервала неисключенных систематических погрешностей устанавливаются с помощью пределов основных и дополнительных погрешностей средств измерения. Под пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей понимают наибольшие основные и дополнительные погрешности, при которых средство измерения может быть признано годным и допущено к употреблению.

Основными называются погрешности, возникающие при нормальных условиях работы: температура $(20+5)$ °С, атмосферное давление $(100+4)$ кПа; относительная влажность воздуха $(60+15)\%$. Нормальные условия включают также определенное пространственное положение прибора, отсутствие вибраций, внешних электрических и магнитных полей, заданное напряжение источника питания и др.

Основные погрешности средства измерения появляются из-за его конструктивных и технологических особенностей: неточная установка шкалы, ее неточное выполнение, отличающиеся свойства упругого элемента, трение в узлах и т. д.

Обобщенной характеристикой средств измерения является класс точности, определяемый пределами допускаемой погрешности, приведенной к

нормирующему значению измеряемой величины. Соответственно можно рассчитать пределы допускаемой основной погрешности:

$$\Delta x = \pm 0,01 \cdot k \cdot x_n, \quad (14.8)$$

где Δx — пределы допускаемой абсолютной основной погрешности (максимальная погрешность); k — класс точности; x_n — нормирующее значение измеряемой величины.

Класс точности приводится на шкале и в паспорте прибора. Чем меньше число, обозначающее класс точности, тем меньше пределы допускаемой основной погрешности и выше точность измерения. Нормирующее значение принимается равным разности верхнего и нижнего пределов измерения.

Класс точности не позволяет определить фактическую абсолютную погрешность измерения, выполняемого посредством имеющегося средства. Однако с его помощью можно установить пределы абсолютной погрешности измерения.

Рассмотрим пример расчета предела допускаемой основной погрешности ваттметра с односторонней шкалой с верхним пределом измерения 1000 Вт и классом точности 0,5;

$$\Delta x = \pm 0,01 \cdot 0,5 \cdot 1000 \text{Вт} = \pm 5 \text{Вт} .$$

Во всем интервале измерения абсолютная основная погрешность ваттметра составляет +5 Вт. Очевидно, что для уменьшения относительной погрешности необходимо выполнять измерения величин, значения которых достаточно близки к верхнему пределу шкалы. Поэтому прибор необходимо подбирать таким образом, чтобы шкала прибора использовалась в пределах от 2/3 до 3/4 ее наибольшего (по модулю) значения.

Кроме нормальных условий в стандартах и технических условиях устанавливается рабочая область значений влияющих величин, в пределах которых нормируется дополнительная погрешность средств измерений, возникающая за счет изменения внешних условий относительно нормальных.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности устанавливаются или в виде долевого (кратного) значения от предела допускаемой основной

погрешности, или в виде постоянных значений для отдельных интервалов рабочей области влияющих величин.

Основная и дополнительная погрешности определяют погрешность используемого средства измерения — инструментальную погрешность. Пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей представляют пределы допускаемых значений среднего квадратического отклонения.

Результаты отдельных измерений при неизменных условиях опыта совпадают в пределах допускаемых погрешностей.

Методические погрешности определяются методикой измерения и не зависят от точности применяемых средств измерения. При разработке методики измерения должны быть установлены причины появления методических погрешностей и приняты меры к их определению с целью дальнейшего исключения из результатов измерения.

Например, если определить площадь поперечного сечения трубы по формуле площади круга, используя данные измерения диаметра, то результат будет содержать методическую погрешность, так как граница сечения трубы не является идеальной окружностью.

При наличии нескольких неисключенных систематических погрешностей граница суммарной неисключенной систематической погрешности результата измерения определяется по уравнению

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \theta_i^2}$$

где k — коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и числа неисключенных систематических погрешностей; θ^2 — граница неисключенной систематической погрешности.

При доверительной вероятности $p = 0,95$ следует принимать $k = 1,1$, а при $p = 0,99$ рекомендуется $k = 1,4$.

В состав неисключенных систематических погрешностей могут быть также включены субъективные погрешности, зависящие от особенностей

наблюдателя. Например, ошибка времени запуска и остановки секундомера составляет 0,2 ... 0,3 с.

Методика выполнения измерений. Измерения подразделяются на точные (лабораторные) и технические. Точные измерения производятся при использовании точных (образцовых) средств измерения. Технические измерения широко применяются в промышленности, сельском хозяйстве, а также при проведении лабораторных исследований. При этом измеряются практически постоянные физические величины с помощью рабочих средств измерения.

Точность используемых средств измерения выбирается в соответствии с поставленной задачей измерения на основании исходных данных об измеряемой величине и допускаемых значениях абсолютной погрешности. В общем случае должны быть заданы доверительные интервал и вероятность. Измерения могут производиться с целью получения только числового значения измеряемой величины или с целью контроля. При контроле устанавливается, находится ли измеряемая величина в пределах допускаемого отклонения от требуемого (контролируемого) значения.

В технике измерений различают однократные и многократные измерения. В обычных рабочих условиях величина измеряется один раз, так как в этих условиях современная измерительная техника гарантирует достаточность однократных измерений (наблюдений). Такие измерения производятся с наименьшей затратой средств и в наиболее короткий срок.

Однократные измерения применяются в следующих случаях:

не требуется высокая точность измерений, преобладающей является систематическая погрешность;

исследуемые процессы нельзя повторить или же их воспроизведение требует значительных экономических затрат (например, редко встречающиеся процессы, такие, как разрушение объекта исследования).

При выполнении технических измерений обычно используются однократные измерения, так как в пределах допускаемых погрешностей средств измерения будут совпадать результаты отдельных измерений.

Многократные измерения требуются в ходе проверок средств измерения, при выполнении точных исследовательских работ, а также при изменении величины в процессе измерения. Во всех этих случаях определяющими уже становятся случайные погрешности, что характерно для проведения точных измерений. Для повышения точности измерения выполняются многократные измерения.

Прямые измерения выполняются в следующей последовательности:

а) подбирается средство измерения в соответствии с данными об интервале значений измеряемой величины, о требуемой точности измерений (допускаемой абсолютной погрешности) и доверительной вероятности;

б) производятся измерения с отсчетом величины по шкале прибора и решается вопрос о достаточности однократного измерения или же о необходимости многократных измерений;

в) результаты измерений записываются в таблицу;

г) устанавливаются причины появления систематических погрешностей, определяются по возможности их значения и производится исключение известных по величине систематических погрешностей из результатов измерения;

д) при однократных измерениях результаты отсчитываются по шкале прибора с учетом вводимых поправок, при многократных измерениях за результат измерения принимается среднее арифметическое исправленных (путем введения поправок) результатов отдельных измерений (результатов наблюдений);

е) рассчитывается граница неисключенных систематических погрешностей по уравнению (14.9);

ж) определяются доверительные границы случайной погрешности по формуле (14.4);

з) вычисляются абсолютная и относительная погрешности измерения;
 и) записывается результат измерения с указанием результата измерения, доверительного интервала (верхнего и нижнего пределов погрешности) и доверительной вероятности.

Например, результаты измерения температуры записываются в форме:

а) $(445 \pm 8) \text{ } ^\circ\text{C}; p = 0,95$ или

б) $445 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta t$ от $-8 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $+8 \text{ } ^\circ\text{C}, p = 0,95$.

Погрешность измерения определяется случайными и неисключенными систематическими погрешностями. При ее расчете встречаются следующие случаи:

а) можно пренебречь неисключенными систематическими погрешностями θ и принять максимальную абсолютную погрешность равной доверительным границам

Случайной погрешности. Для этого случая характерно $\theta/\sigma_x < 0,8; \Delta x = \varepsilon$;

б) можно исключить из рассмотрения случайные погрешности и принять абсолютную погрешность равной границам неисключенной систематической погрешности. Этот случай характеризуется как $\theta/\sigma_x > 8; \Delta = 0$;

в) если вышеприведенные соотношения между составляющими погрешностями не выполняются, то расчет погрешности производится как

$$\Delta x = t_{\Sigma} \cdot \sigma_{\Sigma} \quad 14.10$$

где t_{Σ} — коэффициент, зависящий от соотношения между случайными и неисключенными систематическими погрешностями; σ_{Σ} — среднее квадратическое отклонение результата измерения.

При этом используются зависимости

$$t_{\Sigma} = \frac{\varepsilon + 0}{\sigma_x + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \theta_i^2}$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \theta_i^2}$$

На практике используют упрощенный метод расчета: $\Delta x = 0,8(\varepsilon + \theta)$, однако при этом следует учесть, что абсолютная погрешность не должна быть меньше каждого из слагаемых в скобках.

Косвенные измерения как и прямые могут быть однократными и многократными. При их выполнении должна быть известна функциональная зависимость измеряемой величины от величин, определяемых посредством прямых измерений и независимых друг от друга:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad 14.11$$

где y — измеряемая физическая величина; x_1, x_2, \dots, x_n — физические величины, измеряемые посредством прямых измерений.

На основании этой зависимости производятся расчеты значения и погрешности измеряемой величины. При измерении каждой из величин x_1, x_2, \dots, x_n выполняются действия последовательности, приведенной для прямых измерений.

При оценке точности результата косвенного измерения часто определяют максимальную (предельную) абсолютную погрешность, которая может наблюдаться при наиболее неблагоприятных условиях измерения. Ее расчет производится как

$$\Delta_y = \pm \sum_{i=1}^n \left| \frac{dy}{dx_i} \cdot \Delta x_i \right| \quad 14.11$$

где Δ_y — абсолютная погрешность измерения величины.

При расчете относительной погрешности в этих условиях используется уравнение (14.3): $\sigma_y = \Delta_y / y$.

Изложенный способ расчета погрешности приводит к завышению погрешностей косвенных измерений. В действительности мала вероятность наиболее неблагоприятных условий измерения, когда погрешности прямых измерений будут иметь один знак и одновременно максимальные значения.

Вероятность таких условий уменьшается с увеличением числа величин, определяемых путем прямых измерений.

В связи с этим при числе величин, определяемых прямыми измерениями, больше трех расчет погрешности выполняется по формулам (14.12) и (14.3):

$$\Delta_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{dy}{dx_i} \cdot \Delta x_i \right)^2} \quad 14.12$$

Следует отметить, что расчет погрешностей косвенных измерений не представляет возможным оценить доверительный интервал и доверительную вероятность.

Результат косвенного измерения записывается с указанием пределов погрешности: $y \pm \Delta_y$.

Правила округления чисел и выполнения приближенных вычислений. Числовые значения величин, полученные в результате измерений и используемые в дальнейших расчетах, всегда являются приближенными.

В общем случае в начале приближенного числа записываются нули, показывающие его порядок, далее следуют разряды, в которых записаны верные цифры, и в младших разрядах содержатся сомнительные (запасные) цифры.

Верными называются цифры, если абсолютная погрешность числа не превышает половины единицы разряда, в котором записана рассматриваемая цифра. Цифры, для которых данное условие не выполняется, то есть соизмеримые с погрешностью, называются сомнительными.

В некоторых источниках верными считают цифры, для которых абсолютная погрешность числа не превышает единицы разряда, где записана рассматриваемая цифра.

В данной работе для выделения верных цифр будет использоваться первое определение.

Примеры:

а) На микрокалькуляторе получено $\sin 45^\circ = 0,707106$. В этом числе все цифры верные (ноль в начале числа указывает его порядок) за исключением

цифры 6, записанной в младшем разряде, так как погрешность микрокалькулятора в данном случае достигает единицы младшего разряда;

б) на микрокалькуляторе определено, что $3^4=80,99963$. В этом числе сомнительными являются цифры в двух младших разрядах, то есть 6 и 3, так как погрешность микрокалькулятора при вычислении x^y может достигать пяти единиц предпоследнего разряда;

в) по измеренному объему был найден диаметр шара $d=25,4087$ мм. Абсолютная погрешность измерения $\Delta d = \pm 3$ мм. Следовательно, в числе, характеризующем диаметр, верной будет только цифра 2, указывающая число десятков, а все остальные — сомнительными.

Приближенные числа необходимо округлить в соответствии с нижеуказанными правилами. При округлении числа цифры в младших разрядах заменяются нулями или отбрасываются, если они стоят в конце десятичной дроби. При этом, если отбрасываемая (заменяемая нулем) цифра больше или равна 5, то цифра в соседнем старшем разряде увеличивается на 1. Если же отбрасываемая цифра меньше 5, то цифра в соседнем старшем разряде не изменяется. Например, $3,141\ 592 \approx 3,14$; $9,81 \approx 9,8 \approx 10$; $4,186\ 05 \approx 4,19 \approx 4,2$.

В числе, характеризующем измеряемую величину, при округлении сохраняются все, верные цифры и ближайшая к ним сомнительная (некоторые из них могут быть равны нулю). При этом разряд, в котором записана сомнительная цифра, соответствует старшему разряду числа, представляющего удвоенную абсолютную погрешность измерения. Если абсолютная погрешность точно равна половине единицы какого-либо разряда, то цифра в этом разряде является верной, а в соседнем младшем — сомнительной. Так, в примере из пункта в $d=25,4087$ мм ≈ 25 мм. Такой же результат получится и в случае, если абсолютная погрешность измерения диаметра $\Delta d = \pm 0,6$ мм. При меньшей погрешности $\Delta d = (0,1 \dots 0,5)$ мм $d=25,4$ мм.

В числе, характеризующем абсолютную погрешность, сохраняется (увеличивается на 1) цифра только в старшем разряде. Если в старшем разряде находится цифра

2 или 3, то сохраняются цифры в двух старших разрядах. При этом погрешность числа не превысит 12,5%.

В случаях, когда число измерений при неизменяемых условиях опыта равно 5, ошибка определения абсолютной погрешности измерения достигает 30%. Поэтому при меньшем числе измерений сохранять цифры в двух старших разрядах целесообразно, если в старшем разряде записана 1. Например, $0,001\ 793\ 65 \approx 0,0018$; $436,717 \approx 400$.

В числе, характеризующем относительную погрешность, сохраняются цифры в двух старших разрядах. Например, $1,863\ 54\% \approx 1,9\%$; $0,543\ 69\% \approx 0,54\%$.

В приближенном числе, которое используется в промежуточных расчетах, можно сохранять, кроме верных, сомнительные цифры в двух примыкающих к верным разрядах.

В таблицах математических функций и физических констант приводятся только верные цифры либо указывается погрешность.

Увеличение количества сомнительных цифр сверх необходимого только создает дополнительные трудности, но не увеличивает точности расчетов. Поэтому при выполнении инженерных расчетов и большинства лабораторных исследований вполне достаточно сохранять цифры только в трех старших разрядах числа. Это обеспечивает погрешность расчетов в пределах 0,1 ... 1%, т. е. на уровне точности лабораторных приборов.

Вышеизложенные правила позволяют выделять в числе верные цифры и, следовательно, оценивать абсолютную погрешность числа (она не превышает половины единицы младшего верного разряда). Однако могут возникнуть трудности в нахождении верных разрядов, если одна или несколько последних сохраняемых цифр целого числа равны 0, так как целое число может оканчиваться нулями, которые используются для указания порядка числа. Например, скорость света обычно считают равной 300 000 км/с. Может сложиться впечатление, что в этом числе вообще нет верных цифр. Однако циф-

ры в трех старших разрядах (300) являются верными, так как скорость света равна $(299\,796 \pm 4)$ км/с.

Поэтому приближенные числа рекомендуется записывать в виде $x \cdot 10^n$, где x —число, записанное с помощью верных (и одной сомнительной) цифр, n — целое число (положительное при записи целых чисел и отрицательное при записи десятичных дробей).

Кроме того, рекомендуется множитель 10^n заменять соответствующей кратной или дольной приставкой к единице физической величины. С учетом этих рекомендаций скорость света может быть записана следующим образом: $3,00 \cdot 10^5$ км/с = $300 \cdot 10^3$ км/с. Объем $0,0005$ м³ = $5 \cdot 10^{-4}$ м³ = 0,5 л. Последний пример показывает также, что рациональный выбор единиц делает физическую величину более наглядной.

Следует отметить, что запись числа со множителем 10^n при $n < 3$ становится громоздкой, поэтому в данном случае целесообразно число записывать в обычной форме, если при этом не возникнут трудности оценки верных цифр. Например, вместо $5,5 \cdot 10^2 + 0,4 \cdot 10^2$ целесообразно записать $550 + 40$, так как в первом случае для записи числа используется 15 знаков, а во втором только 6.

Погрешность результата математических операций с приближенными числами не может быть меньше погрешности наименее точного числа, используемого при вычислениях. Поэтому при выполнении арифметических действий с приближенными числами используются следующие правила:

- а) результат сложения или вычитания следует округлить до наименьшего из верных разрядов, имеющегося во всех числах;
- б) необходимо избегать вычислений искомой величины с помощью вычитания близких чисел, так как это приводит к существенному возрастанию погрешности результата вычислений;
- в) результат умножения или деления следует записывать, используя столько же верных цифр, сколько их содержится в наименее точном числе;

г) при умножении или делении может происходить уменьшение числа верных цифр в произведении или частном по сравнению с числом верных цифр в наименее точном из используемых чисел (на одну, две при числе сомножителей или делителей не более 10).

Например:

$$10,2+0,367+0,0059 = 10,5729 \approx 10,6.$$

Абсолютная погрешность суммы определяется суммированием погрешностей чисел, в которых считаем все цифры верными: $0,05+0,0005+0,00005=0,05055 \approx 0,051$. Таким образом, последняя цифра в записи суммы уже не является верной.

$$235,5-234,682=0,818 \approx 0,8.$$

Абсолютная погрешность разности также определяется суммированием погрешностей чисел: $0,05+0,0005=0,0505 \approx 0,051$. В полученной разности уже нет верных цифр и необоснованным было бы сохранение еще одной цифры.

$$4,323 \cdot 25,1 = 108,5073 \approx 109.$$

Относительная погрешность произведения (как и частного) равняется сумме относительных погрешностей сомножителей (или делимого и делителя):

$$0,0005/4,323+0,05/25,1 \approx 2,1 \cdot 10^{-3}.$$

Абсолютная погрешность произведения составляет $2,1 \cdot 10 \cdot 109 = 0,23$.

В полученном произведении все цифры являются верными, так как $0,23 < 1/2 \cdot 1$.

$$109 \cdot 109 = 11\,881 = 11,9 \cdot 10^3.$$

Рассчитаем абсолютную погрешность, используя данные вышеприведенного примера: $(0,23/109 + 0,23/109) \cdot 119 \cdot 10^2 = 50,2$.

В значении произведения верными являются только первые две цифры, цифра 9 уже относится к сомнительным, так как $50,2 > 1/2 \cdot 10^2$.

Графическое оформление результатов измерений. При обработке и обобщении результатов измерений широко используется графическое изоб-

ражение изучаемой функциональной зависимости. Графики делают зависимость более наглядной и упрощают подбор аналитической формулы.

Для построения графика может быть использована любая система координат: полярная, косоугольная и т. п., но чаще всего применяется прямоугольная (декартова) .

Оси координат выполняются сплошными толстыми линиями, стрелки на их концах обозначать не рекомендуется. На координатных осях наносятся шкалы, на основе которых строится координатная сетка. Поэтому для построения графиков удобно использовать разграфленную в клеточку бумагу, например, миллиметровую.

Шкалы декартовой системы координат бывают равномерными, на которых откладывается изучаемая величина, либо функциональными, являющимися равномерными только по отношению к некоторой функции интересующей величины. Если на такой шкале откладывать значения исследуемой величины, то функциональная шкала будет неравномерной. Из функциональных шкал чаще всего применяются логарифмические. Преимуществом функциональной шкалы является то, что при правильном выборе функции экспериментальный график принимает вид прямой линии, что существенно упрощает обработку опытных данных.

При построении равномерных шкал выполняются требования:

а) шкала должна охватывать весь интервал значений изучаемой величины;

б) соответственно выбираются интервал и шаг шкалы, разность значений изучаемой величины и длина отрезка шкалы между соседними делениями. Интервал и шаг выбираются из следующего ряда чисел $1 \cdot 10^n$,

$\cdot 10^n$, $(2,5 \cdot 10^n)$, $(4 \cdot 10^n)$, $5 \cdot 10^n$, где n — любое число целое (положительное или отрицательное). Числа в скобках следует по возможности не применять. При выполнении лабораторных работ целесообразно принимать интервал, равный 1 см;

в) при $n > 3$ рекомендуется множитель 10^n выносить к буквенному обозначению величины, откладываемой на этой шкале, или заменить соответствующей кратной или дольной приставкой к единице рассматриваемой величины;

г) шкалу следует начинать с нуля или с числа из предпочтительного ряда, несколько меньшего, чем минимальное значение соответствующей величины;

д) если обе шкалы начинаются с нуля, то ноль ставится только один раз;

е) длина шкалы выбирается такой, чтобы погрешности построения графиков и чтения шкалы не превышали погрешность измерения;

ж) как правило, значения величины записываются у каждого штриха, разделяющего интервалы, но в целях повышения наглядности («читаемости») шкалы и сокращения работы допускается записывать значения величины через 2,5 или 10 интервалов;

з) записывать на шкале числа из ряда опытных данных не рекомендуется.

С учетом вышесказанного длина шкалы оценивается как $l = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta_x} \Delta x_{\text{ш}}$,

где x_{\max} — максимальное значение величины; x_{\min} — минимальное значение величины; Δ_x — погрешность измерения; $\Delta x_{\text{ш}}$ — погрешность чтения шкалы (возможно принять равной 1 мм).

Например, требуется построить шкалу для подачи насоса, которая в опыте изменялась от 0 до 5,6 л/с. Максимальная погрешность измерения расхода составляла 0,05 л/с. В этом случае $(5,6 - 0) / 0,05 = 112$ мм.

Длину шкалы целесообразно взять равной 120 мм с шагом 0,5 л/с и числом интервалов 12. При этом 1 мм шкалы соответствует 0,05 л/с, то есть максимальной погрешности измерения расхода.

Примеры оформления шкалы приведены в приложениях (табл. 8.3).

Графики удобно строить на специально разграфленной бумаге: миллиметровой, логарифмической и полулогарифмической.

После подготовки шкал и выполнения координатной сетки наносятся опытные точки (линии их построения не показываются). Затем проводится главная линия с наибольшим приближением к точкам. Если вид изучаемой функции неизвестен и количество опытных точек ограничено, то точки соединяют прямыми линиями.

В случае необходимости у каждой точки может быть показана абсолютная погрешность в виде отрезка, параллельного соответствующей шкале. Отрезок имеет длину, соответствующую двум абсолютным погрешностям, и центр, совпадающий с опытной точкой.

Опытные точки, относящиеся к разным условиям эксперимента, наносятся с использованием разных обозначений—треугольник, круг, квадрат и т. д. При наличии нескольких графиков используются разные линии—сплошные, штриховые, штрихпунктирные и т. д. Кривые на графике, как и сам график, следует вычерчивать при помощи чертежных инструментов.

График должен содержать минимум подписей, все пояснения, указания и другие разъяснения должны быть вынесены в подрисуночную подпись или текст.

Наименование величин, значения которых откладываются на шкалах координатных осей, должны быть заменены буквенным обозначением.

Порядок выполнения работы:

а) выбрать (с помощью преподавателя) одну физическую величину, определяемую при помощи прямых измерений, например время наполнения мерного сосуда, и другую — при помощи косвенных, например площадь поперечного сечения пластмассовой трубы (эти трубы обычно деформированы);

б) ознакомиться с приборами (секундомером и штангенциркулем), записать в отчете наименьшее и наибольшее значения величин на шкале приборов и цену наименьшего деления. Оценить и записать инструментальные погрешности и погрешность отсчета. У секундомера дополнительно определить путем сопоставления с показаниями эталонных часов систематическую по-

грешность, вызванную неточностью хода. Указанные записи оформить в виде таблицы;

в) подготовить таблицы для записи результатов измерений и расчетов заданных физических величин. В таблице должны быть графы: № опыта, результат конкретного измерения, некоторые результаты промежуточных вычислений, например, $\sum x_i$, $(x_i - \bar{x})^2$, $\sum (x_i - \bar{x})^2$;

г) измерить при постоянных условиях опыта заданные величины 5 раз и записать в таблицу. В таблице следует записывать измеряемые величины в единицах, указанных на шкале приборов;

д) найти для величины, получаемой прямыми измерениями, с помощью формул (14.1), (14.5), (14.4) и среднеарифметическое значение измеряемой величины, среднеквадратическое отклонение среднего результата измерения, границу доверительного интервала случайной погрешности, границу неисключенной систематической погрешности и определить общую абсолютную погрешность измерения. При этом в случае необходимости дополнительно использовать формулу (14.11). Указанные в данном пункте вычисления выполнить в случаях использования результатов измерений первых трех опытов и всех пяти;

е) для величины, получаемой косвенными измерениями, дополнительно к указанному в предыдущем пункте определить измеряемую величину с помощью ее зависимости от величины, получаемой прямыми измерениями, и с помощью формулы (14.14) найти абсолютную погрешность измерения;

ж) определить для всех случаев по формуле (14.3) относительную погрешность, сопоставить результаты и дать заключение о точности измерений;

з) проверить, используя формулу (14.7), отсутствие промахов.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается понятие «жидкость» от ее модели?
2. В чем состоит основное правило размерности?
3. Как округляются числа, характеризующие измеренную величину, а также абсолютную и относительную погрешности?
4. Как определяется погрешность величины, полученной прямыми измерениями?
5. Как определяется погрешность величины, полученной косвенными измерениями?

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Штеренлихт Д.В. Гидравлика, -М. Энергоатомиздат, 1992 г.
2. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы М: Машиностроение, 1982 г. – 380 с.
3. К.Ш.Латипов, А.Арифжанов, Х.Кадиров, Б.Тошов «Гидравлика ва гидравлик машиналар», Навоий. Алишер Навоий, 2014 й.
4. Р.Р.Чугаев «Гидравлика» Ленинград энергоиздат Ленинградское отделение 1982 й.
5. Melvyn Kay, Practical Hydraulics (Taylor & Francis 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN) 2008.-253 pages
6. John Fenton A First Course in Hydraulics (Vienna University of Technology, Austria), 2012. -120 pages
7. А.Арифжанов, П.Н.Гурина. Гидравлика. -Ташкент. ТИМИ, 2011г.
8. www.gidravlika-obi-life.zn.uz

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	5
	Предмет и метод гидравлики	5
	Жидкость. Внешние силы, действующие на жидкость.	6
	Физические свойства жидкостей	9
	I. ГИДРОСТАТИКА	
1	ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ	15
2	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ	21
	II. ГИДРОДИНАМИКА	
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ	26
4	ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ	34
5	ПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА	40
6	ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА	45
	III. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	
7	ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСХОДА ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ	53
8	ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ ЖИДКОСТИ	60
9	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НАСОСОВ	66
10	ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ	76
11	ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРИНЦИПА РАБОТЫ СТРУЙНОГО НАСОСА	81
12	ТАРИРОВКА ВОДОМЕРНОЙ УСТАНОВКИ	88
13	ИССЛЕДОВАНИЕ СИФОННЫХ ВОДОИЗМЕРИТЕЛЕЙ В ОРОШАЕМОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ	93
14	ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	98
	Приложение	
	Литература	

