

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«Югорский государственный университет»**  
**НИЖНЕВАРТОВСКИЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИКУМ (филиал)**  
**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения**  
**высшего профессионального образования**  
**«Югорский государственный университет»**



**МДК.02.01.**  
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**  
**(В РАЗДЕЛЕ ГИДРАВЛИКА)**

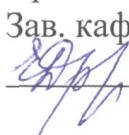
**Краткий курс лекций для студентов очной формы обучения**  
**специальности 131003.51 Бурение нефтяных и газовых скважин**

**Нижневартовск 2014**

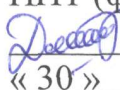
**ББК 33.131**

**Э-41**

**РАССМОТРЕНО**

На заседании кафедры Э и Б  
Протокол № 01 от 28.01.2014г.  
Зав. кафедрой  
 Е. Г. Драницына

**УТВЕРЖДАЮ**

Председатель методического совета  
ННТ (филиал) ФГБОУ ВПО «ЮГУ»  
 Т. А. Дмитриева  
« 30 » января 2014г.

Соответствует:

1. Федеральному государственному образовательному стандарту среднего профессионального образования по специальности 131003.51 Бурение нефтяных и газовых скважин, утв. 17.03.2010 г.
2. Рабочей программе профессионального модуля ПМ.02 Эксплуатация бурового оборудования в части МДК.02.01. Гидравлика, утв. 17.03.2010 г.

Краткий курс лекций разработал:

Кавташкина Инна Юрьевна, преподаватель первой квалификационной категории

Рецензенты:

1. Драницына Е.Г., преподаватель высшей квалификационной категории ННТ (филиала) ФГБОУ ВПО «ЮГУ».
2. Ковалев А.Ю., к.т.н., заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело» Нижневартовский филиал ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет».

Замечания, предложения и пожелания направлять в Нижневартовский нефтяной техникум (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Югорский государственный университет» по адресу: 628615, Тюменская обл., Ханты-Мансийский автономный округ, г. Нижневартовск, ул. Мира, 37.

# 1 ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ ГИДРАВЛИКИ И КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Решение различных технических проблем, связанных с вопросами движения жидкостей в открытых и закрытых руслах, а также с вопросами силового воздействия жидкости на стенки сосудов или обтекаемые жидкостью твердые тела привело к созданию обширной науки называемой гидромеханикой, которая делится на два раздела: техническая гидромеханика и теоретическая механика жидкости и газа (рис.1.1).

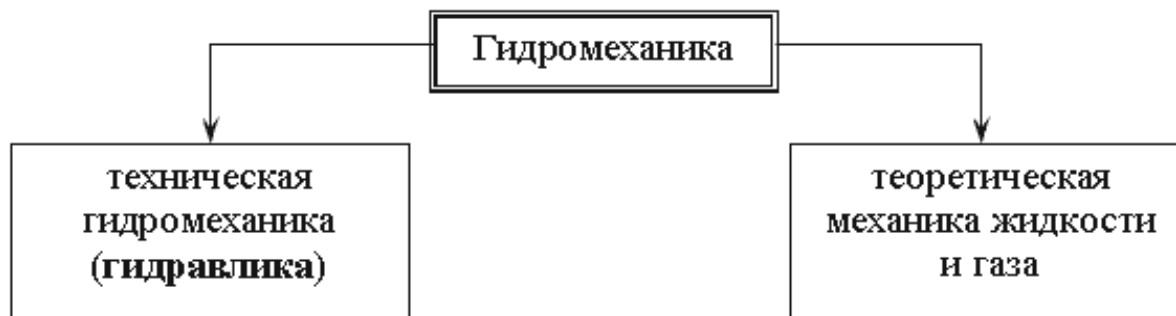


Рисунок 1.1 - Разделы гидромеханики

*Гидравлика* (техническая механика жидкости) - прикладная часть гидромеханики, которая использует те или иные допущения для решения практических задач. Она обладает сравнительно простыми методиками расчета по сравнению с теоретической механикой жидкости, где применяется сложный математический аппарат. Однако гидравлика дает достаточную для технических приложений характеристику рассматриваемых явлений.

## 1.1 Краткая история развития гидравлики

Исторически гидравлика является одной из самых древних наук в мире. Археологические исследования показывают, что еще за 5000 лет до нашей эры в Китае, а затем в других странах древнего мира найдены описания устройства различных гидравлических сооружений, представленные в виде рисунков (первых чертежей). Естественно, что никаких расчетов этих сооружений не производилось, и все они были построены на основании практических навыков и правил.

Первые указания о научном подходе к решению гидравлических задач относятся к 250 году до н.э., когда Архимедом был открыт закон о равновесии тела, погруженного в жидкость. Потом на протяжении 1500 лет особых изменений гидравлика не получала. Наука в то время почти совсем не развивалась, образовался своего рода застой. И только в XVI-XVII веках нашей эры в эпоху Возрождения, или как говорят историки Ренессанса, появились работы Галилея, Леонардо да Винчи, Паскаля, Ньютона, кото-

рые положили серьезное основание для дальнейшего совершенствования гидравлики как науки.

Однако только основополагающие работы академиков Петербургской академии наук Даниила Бернулли и Леонарда Эйлера живших в XVIII веке, создали прочный фундамент, на котором основывается современная гидравлика. В XIX-XX веках существенный вклад в гидродинамику внес "отец русской авиации" Николай Егорович Жуковский.

Роль гидравлики в современном машиностроении трудно переоценить. Любой автомобиль, летательный аппарат, морское судно не обходится без применения гидравлических систем. Добавим сюда строительство плотин, дамб, трубопроводов, каналов, водосливов. На производстве просто не обойтись без гидравлических прессов, способных развивать колоссальные усилия. А вот интересный факт из истории строительства Эйфелевой башни. Перед тем как окончательно установить многотонную металлоконструкцию башни на бетонные основания, ей придали строгое вертикальное положение с помощью четырех гидравлических прессов, установленных под каждую опору. Гидравлика преследует человека повсюду: на работе, дома, на даче, в транспорте. Сама природа подсказала человеку устройство гидравлических систем. Сердце - насос, печень - фильтр, почки - предохранительные клапаны, кровеносные сосуды - трубопроводы, общая длина которых в человеческом организме около 100 000 км. Наше сердце перекачивает за сутки 60 тонн крови (это целая железнодорожная цистерна!).

## 1.2 Жидкость и силы действующие на нее

*Жидкостью* в гидравлике называют физическое тело способное изменять свою форму при воздействии на нее сколь угодно малых сил. Различают два вида жидкостей: жидкости капельные и жидкости газообразные (рис.1.2). Капельные жидкости представляют собой жидкости в обычном, общепринятом понимании этого слова (вода, нефть, керосин, масло и т.д.). Газообразные жидкости - газы, в обычных условиях представляют собой газообразные вещества (воздух, кислород, азот, пропан и т.д.).



Рисунок 1.2 - Виды жидкостей

Основной отличительной особенностью капельных и газообразных жидкостей является способность сжиматься (изменять объем) под воздей-

ствием внешних сил. Капельные жидкости (в дальнейшем просто жидкости) трудно поддаются сжатию, а газообразные жидкости (газы) сжимаются довольно легко, т.е. при воздействии небольших усилий способны изменить свой объем в несколько раз (рис.1.3).

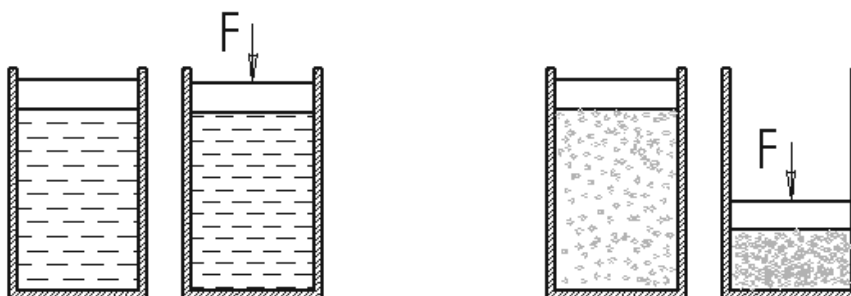


Рисунок 1.3 - Сжатие жидкостей и газов

В гидравлике рассматриваются *реальная* и *идеальная* жидкости. Идеальная жидкость в отличие от реальной жидкости не обладает внутренним трением, а также трением о стенки сосудов и трубопроводов, по которым она движется. Идеальная жидкость также обладает абсолютной несжимаемостью. Такая жидкость не существует в действительности, и была придумана для облегчения и упрощения ряда теоретических выводов и исследований.

На жидкость постоянно воздействуют внешние силы, которые разделяют на массовые и поверхностные.

Массовые: силы тяжести и инерции. Сила тяжести в земных условиях действует на жидкость постоянно, а сила инерции только при сообщении объему жидкости ускорений (положительных или отрицательных).

Поверхностные: обусловлены воздействием соседних объемов жидкости на данный объем или воздействием других тел.

Рассмотрим сосуд, наполненный жидкостью. Если выделить в нем бесконечно малый объем жидкости, то на этот объем будут действовать силы со стороны соседних таких же бесконечно малых объемов. Кроме этого на свободную поверхность жидкости действует сила атмосферного давления  $P_{атм}$  и силы со стороны стенок сосуда.

Если на жидкость действует какая-то внешняя сила, то говорят, что жидкость находится под давлением. Обычно для определения давления жидкости, вызванного воздействием на нее поверхностных сил, применяется формула

$$P = \frac{F}{S}, \text{ (Н/м}^2\text{) или (Па),}$$

Если давление  $P$  отсчитывают от абсолютного нуля, то его называют абсолютным давлением  $P_{абс}$ . Если давление отсчитывают от атмосферного, то оно называется избыточным  $P_{изб}$ . Атмосферное давление постоянно  $P_a = 103 \text{ кПа}$  (рис.1.5).

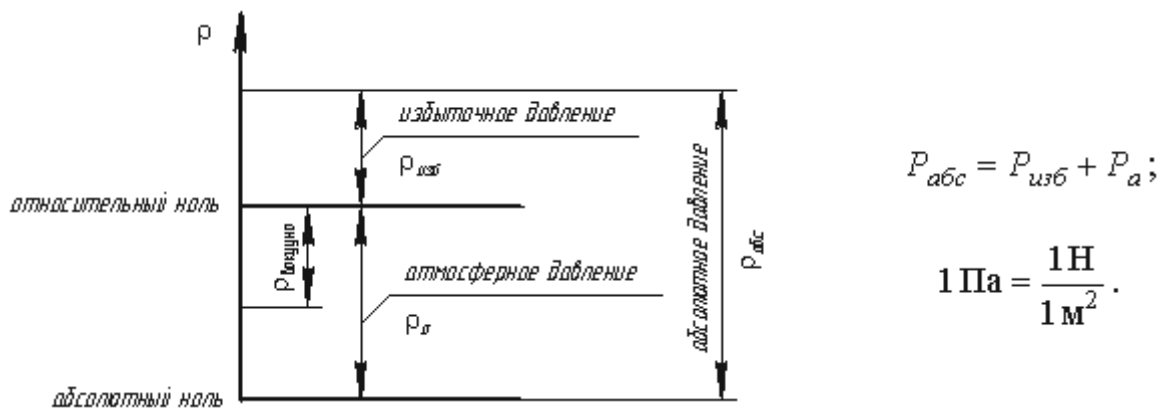


Рисунок 1.4 - Схема к определению давлений

За единицу давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль - давление вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>:

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

Размерность давления обозначается как "Па" (паскаль), "кПа" (килопаскаль), "МПа" (мегапаскаль). В технике в настоящее время продолжают применять систему единиц МКГСС, в которой за единицу давления принимается 1 кгс/м<sup>2</sup>.

$$1 \text{ Па} = 0,102 \text{ кгс/м}^2 \text{ или } 1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па}.$$

### 1.3 Механические характеристики и основные свойства жидкостей

Одной из основных механических характеристик жидкости является ее плотность. *Плотностью* жидкости называют массу жидкости заключенную в единице объема.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

*Удельным весом* называют вес единицы объема жидкости, который определяется по формуле:

$$\beta_V = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \text{ (м}^2\text{/Н)},$$

С увеличением температуры удельный вес жидкости уменьшается.

#### **Основные физические свойства:**

1. *Сжимаемость* - свойство жидкости изменять свой объем под действием давления. Сжимаемость жидкости характеризуется коэффициентом объемного сжатия, который определяется по формуле

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ (Н/ м}^3\text{)}.$$

где  $V$  – первоначальный объем жидкости,  
 $dV$  – изменение этого объема, при увеличении давления на величину  $dP$ .

Величина обратная  $\beta V$  называется модулем объемной упругости жидкости:

$$K = \frac{1}{\beta} \text{ (Н/м}^2\text{)}.$$

Модуль объемной упругости не постоянен и зависит от давления и температуры. При гидравлических расчетах сжимаемостью жидкости обычно пренебрегают и считают жидкости практически несжимаемыми. Сжатие жидкостей в основном обусловлено сжатием растворенного в них газа. Сжимаемость понижает жесткость гидропривода, т.к., на сжатие затрачивается энергия. Сжимаемость может явиться причиной возникновения автоколебаний в гидросистеме, создает запаздывание в срабатывании гидроаппаратуры и исполнительных механизмах. Иногда сжимаемость жидкостей полезна - ее используют в гидравлических амортизаторах и пружинах.

Температурное расширение - относительное изменение объема жидкости при увеличении температуры на  $1^\circ\text{C}$  при  $P = \text{const}$ . Характеризуется коэффициентом температурного расширения

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \text{ (1/}^\circ\text{C)}.$$

Поскольку для капельных жидкостей коэффициент температурного расширения ничтожно мал, то при практических расчетах его не учитывают.

Сопротивление растяжению. Особыми физическими опытами было показано, что покоящаяся жидкость (в частности вода, ртуть) иногда способна сопротивляться очень большим растягивающим усилиям. Но в обычных условиях такого не происходит, и поэтому считают, что жидкость не способна сопротивляться растягивающим усилиям.

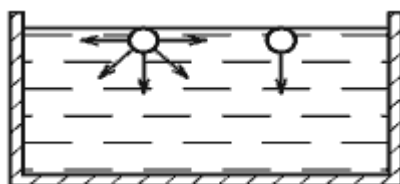


Рисунок 1.5 - Силы поверхностного натяжения

Силы поверхностного натяжения - эти силы стремятся придать сферическую форму жидкости. Силы поверхностного натяжения обусловлены поверхностными силами и направлены всегда внутрь рассматриваемого объема перпендикулярно свободной поверхности жидкости. Рассмотрим бесконечно малый объем жидкости на свободной поверхности. На него будут действовать силы со стороны соседних объемов. В результате, если

сложить вектора всех сил действующих на рассматриваемый объем, то суммарная составляющая сила будет направлена перпендикулярно внутрь рассматриваемого объема.

Вязкость жидкости - свойство жидкости сопротивляться скольжению или сдвигу ее слоев. Суть ее заключается в возникновении внутренней силы трения между движущимися слоями жидкости, которая определяется по формуле Ньютона

$$T = \mu S \frac{dv}{dy} \text{ (Н)},$$

Отсюда динамическая вязкость равна

$$\mu = \tau \frac{dy}{dv} \text{ (Н·с/м}^2\text{)},$$

При течении вязкой жидкости вдоль твердой стенки происходит торможение потока, обусловленное вязкостью (рис.1.6). Скорость уменьшается по мере уменьшения расстояния  $y$  от стенки. При этом при  $y = 0$ , скорость падает до нуля, а между слоями происходит проскальзывание, сопровождающееся возникновением касательных напряжений  $\tau$ .

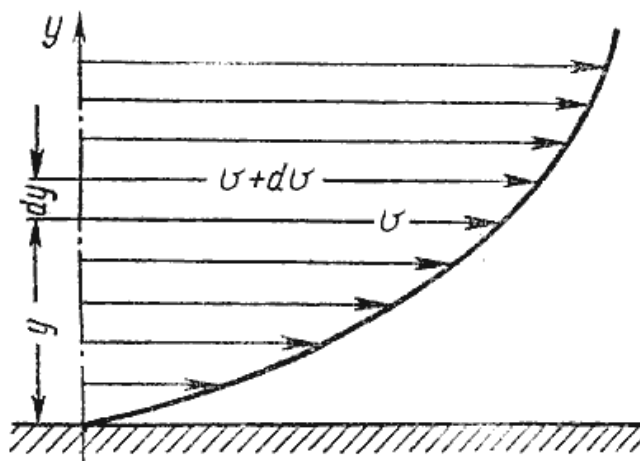


Рисунок 1.6 - Профиль скоростей при течении вязкой жидкости вдоль стенки

Величина обратная динамическому коэффициенту вязкости ( $1/\mu$ ) называется текучестью жидкости.

Отношение динамического коэффициента вязкости к плотности жидкости называется кинематическим коэффициентом вязкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ (м}^2\text{/с)}.$$

Величина  $\nu$  (произносится "ню") равная  $1\text{см}^2\text{/с}$  называется стоксом (Ст), а  $0,01\text{ Ст}$  - 1 сантистоксом (сСт).

Процесс определения вязкости называется вискозиметрией, а приборы, которыми она определяется вискозиметрами. Помимо оценки вязкости с помощью динамического и кинематического коэффициентов пользуются



условной вязкостью - градусы Энглера ( E). Вязкостью, выраженной в градусах Энглера, называется отношение времени истечения 200 см<sup>3</sup> испытуемой жидкости через капилляр d = 2,8 мм к времени истечения такого же объема воды при t = 20 С

$$1^{\circ}E = \frac{t}{t_{\text{воды}}}, \text{ где } t_{\text{воды}} = 51,6 \text{ сек.}$$

Такой прибор называется вискозиметром Энглера. Для пересчета градусов Энглера в стоксы для минеральных масел применяется формула

$$\nu = 0,073^{\circ}E - \frac{0,063}{^{\circ}E}.$$

Таким образом, для оценки вязкости жидкости можно использовать три величины, которые связаны между собой



Рисунок 1.7 - Способы оценки вязкости жидкости

Вязкость жидкости зависит от температуры и от давления. При повышении температуры вязкость жидкости уменьшается и наоборот. У газов наблюдается обратное явление: с повышением температуры вязкость увеличивается, с понижением температуры - уменьшается.

Пенообразование. Выделение воздуха из рабочей жидкости при падении давления может вызвать пенообразование. На интенсивность пенообразования оказывает влияние содержащаяся в рабочей жидкости вода: даже при ничтожном количестве воды (менее 0,1% по массе рабочей жидкости) возникает устойчивая пена. Образование и стойкость пены зависят от типа рабочей жидкости, от ее температуры и размеров пузырьков, от материалов и покрытий гидроаппаратуры. Особенно пенообразование происходит интенсивно в загрязненных жидкостях и бывших в эксплуатации. При температуре жидкости свыше 70 С происходит быстрый спад пены.

Химическая и механическая стойкость. Характеризует способность жидкости сохранять свои первоначальные физические свойства при эксплуатации и хранении.

Окисление жидкости сопровождается выпадением из нее смол и шлаков, которые откладываются на поверхности элементов гидропривода в виде твердого налета. Снижается вязкость и изменяется цвет жидкости. Продукты окисления вызывают коррозию металлов и уменьшают надежность работы гидроаппаратуры. Налет вызывает заклинивание подвижных

соединений, плунжерных пар, дросселирующих отверстий, разрушение уплотнений и разгерметизацию гидросистемы.

**Совместимость.** Совместимость рабочих жидкостей с конструкционными материалами и особенно с материалами уплотнений имеет очень большое значение. Рабочие жидкости на нефтяной основе совместимы со всеми металлами, применяемыми в гидромашиностроении, и плохо совместимы с уплотнениями, изготовленными из синтетической резины и из кожи. Синтетические рабочие жидкости плохо совмещаются с некоторыми конструкционными материалами и не совместимы с уплотнениями из маслостойкой резины.

**Испаряемость жидкости.** Испаряемость свойственна всем каплевым жидкостям, однако интенсивность испарения неодинакова у различных жидкостей и зависит от условий в которых она находится: от температуры, от площади испарения, от давления, и от скорости движения газообразной среды над свободной поверхностью жидкости (от ветра).

**Растворимость газов в жидкостях** характеризуется объемом растворенного газа в единице объема жидкости и определяется по закону Генри:

$$V_{\Gamma} = V_{\text{ж}} k \frac{P}{P_a};$$

Коэффициент  $k$  имеет следующие значения при 20 С: для воды 0,016, керосина 0,13, минеральных масел 0,08, жидкости АМГ-10 - 0,1. При понижении давления выделяется растворимый в жидкости газ. Это явление может отрицательно сказываться на работе гидросистем.

## 2 ОСНОВЫ ГИДРОСТАТИКИ

Гидравлика делится на два раздела: гидростатика и гидродинамика. Гидродинамика является более обширным разделом и будет рассмотрена в последующих лекциях. В этой лекции будет рассмотрена гидростатика. Гидростатикой называется раздел гидравлики, в котором рассматриваются законы равновесия жидкости и их практическое применение.

### 2.1 Гидростатическое давление

В покоящейся жидкости всегда присутствует сила давления, которая называется гидростатическим давлением. Жидкость оказывает силовое воздействие на дно и стенки сосуда. Частицы жидкости, расположенные в верхних слоях водоема, испытывают меньшие силы сжатия, чем частицы жидкости, находящиеся у дна.

Рассмотрим резервуар с плоскими вертикальными стенками, наполненный жидкостью (рис.2.1, а). На дно резервуара действует сила  $P$  равная весу налитой жидкости  $G = \gamma V$ , т.е.  $P = G$ .

Если эту силу  $P$  разделить на площадь дна  $S_{abcd}$ , то мы получим среднее гидростатическое давление, действующее на дно резервуара.

Гидростатическое давление обладает свойствами.

Свойство 1. В любой точке жидкости гидростатическое давление перпендикулярно площадке касательной к выделенному объему и действует внутрь рассматриваемого объема жидкости.

Для доказательства этого утверждения вернемся к рисунку 2.1, а. Выделим на боковой стенке резервуара площадку  $S_{бок}$  (заштриховано). Гидростатическое давление действует на эту площадку в виде распределенной силы, которую можно заменить одной равнодействующей, которую обозначим  $P$ . Предположим, что равнодействующая гидростатического давления  $P$ , действующая на эту площадку, приложена в точке  $A$  и направлена к ней под углом  $\phi$  (на рис. 2.1 обозначена штриховым отрезком со стрелкой). Тогда сила реакции стенки  $R$  на жидкость будет иметь ту же самую величину, но противоположное направление (сплошной отрезок со стрелкой). Указанный вектор  $R$  можно разложить на два составляющих вектора: нормальный  $R_n$  (перпендикулярный к заштрихованной площадке) и касательный  $R_t$  к стенке.

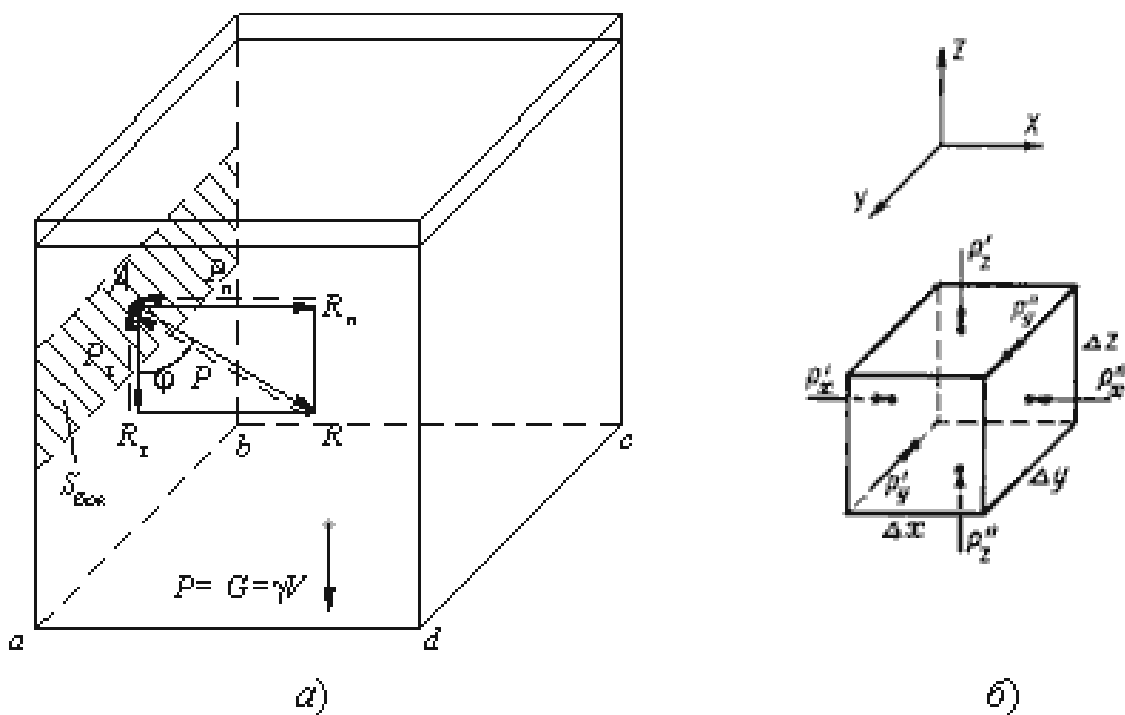


Рисунок 2.1. - Схема, иллюстрирующая свойства гидростатического давления а - первое свойство; б - второе свойство

Сила нормального давления  $R_n$  вызывает в жидкости напряжения сжатия. Этим напряжениям жидкость легко противостоит. Сила  $R_t$ , действующая на жидкость вдоль стенки, должна была бы вызвать в жидкости касательные напряжения вдоль стенки и частицы должны были бы перемещаться вниз. Но так как жидкость в резервуаре находится в состоянии

покою, то составляющая  $R_t$  отсутствует. Отсюда можно сделать вывод первого свойства гидростатического давления.

Свойство 2. Гидростатическое давление неизменно во всех направлениях.

В жидкости, заполняющей какой-то резервуар, выделим элементарный кубик с очень малыми сторонами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  (рис.2.1, б). На каждую из боковых поверхностей будет давить сила гидростатического давления, равная произведению соответствующего давления  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  на элементарные площади. Обозначим вектора давлений, действующие в положительном направлении (согласно указанным координатам) как  $P'_x$ ,  $P'_y$ ,  $P'_z$ , а вектора давлений, действующие в обратном направлении соответственно  $P''_x$ ,  $P''_y$ ,  $P''_z$ .

Вследствие того, что кубик не деформируется (не вытягивается вдоль одной из осей), надо полагать, что давления по различным осям одинаковы, т.е.

$$P'_x = P''_x = P'_y = P''_y = P'_z = P''_z$$

Это доказывает второе свойство гидростатического давления.

Свойство 3. Гидростатическое давление в точке зависит от ее координат в пространстве.

Это положение не требует специального доказательства, так как ясно, что по мере увеличения погружения точки давление в ней будет возрастать, а по мере уменьшения погружения уменьшаться.

## 2.2 Основное уравнение гидростатики

Рассмотрим распространенный случай равновесия жидкости, когда на нее действует только одна массовая сила - сила тяжести, и получим уравнение, позволяющее находить гидростатическое давление в любой точке рассматриваемого объема жидкости. Это уравнение называется основным уравнением гидростатики.

Пусть жидкость содержится в сосуде (рис.2.2) и на ее свободную поверхность действует давление  $P_0$ . Найдем гидростатическое давление  $P$  в произвольно взятой точке  $M$ , расположенной на глубине  $h$ . Выделим около точки  $M$  элементарную горизонтальную площадку  $dS$  и построим на ней вертикальный цилиндрический объем жидкости высотой  $h$ . Рассмотрим условие равновесия указанного объема жидкости, выделенного из общей массы жидкости. Давление жидкости на нижнее основание цилиндра теперь будет внешним и направлено по нормали внутрь объема, т.е. вверх.

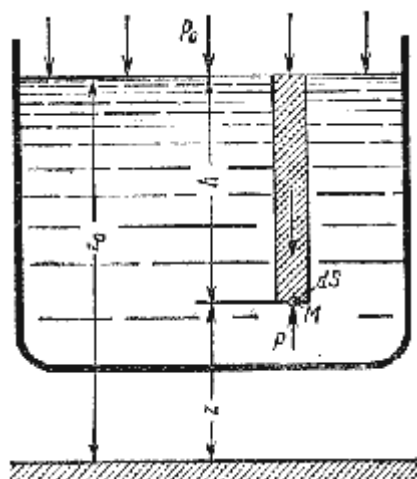


Рисунок 2.2 - Схема для вывода основного уравнения гидростатики

Запишем сумму сил, действующих на рассматриваемый объем в проекции на вертикальную ось:

$$PdS - P_0dS - \rho gh dS = 0$$

Последний член уравнения представляет собой вес жидкости, заключенный в рассматриваемом вертикальном цилиндре объемом  $hdS$ . Силы давления по боковой поверхности цилиндра в уравнение не входят, т.к. они перпендикулярны к этой поверхности и их проекции на вертикальную ось равны нулю. Сократив выражение на  $dS$  и перегруппировав члены, найдем

$$P = P_0 + \rho gh = P_0 + \gamma h$$

Полученное уравнение называют основным уравнением гидростатики. По нему можно посчитать давление в любой точке покоящейся жидкости. Это давление, как видно из уравнения, складывается из двух величин: давления  $P_0$  на внешней поверхности жидкости и давления, обусловленного весом вышележащих слоев жидкости.

Из основного уравнения гидростатики видно, что какую бы точку в объеме всего сосуда мы не взяли, на нее всегда будет действовать давление, приложенное к внешней поверхности  $P_0$ . Другими словами давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости по всем направлениям одинаково. Это положение известно под названием закона Паскаля.

Поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется поверхностью уровня. В обычных условиях поверхности уровня представляют собой горизонтальные плоскости.

### 2.3 Давление жидкости на плоскую наклонную стенку

Пусть мы имеем резервуар с наклонной правой стенкой, заполненный жидкостью с удельным весом  $\gamma$ . Ширина стенки в направлении, перпенди-

кулярном плоскости чертежа, равна  $b$  (рис.2.3). Стенка условно показана развернутой относительно оси АВ и заштрихована на рисунке. Построим график изменения избыточного гидростатического давления на стенку АВ.

Так как избыточное гидростатическое давление изменяется по линейному закону  $P=\gamma gh$ , то для построения графика, называемого эпюрой давления, достаточно найти давление в двух точках, например А и В.

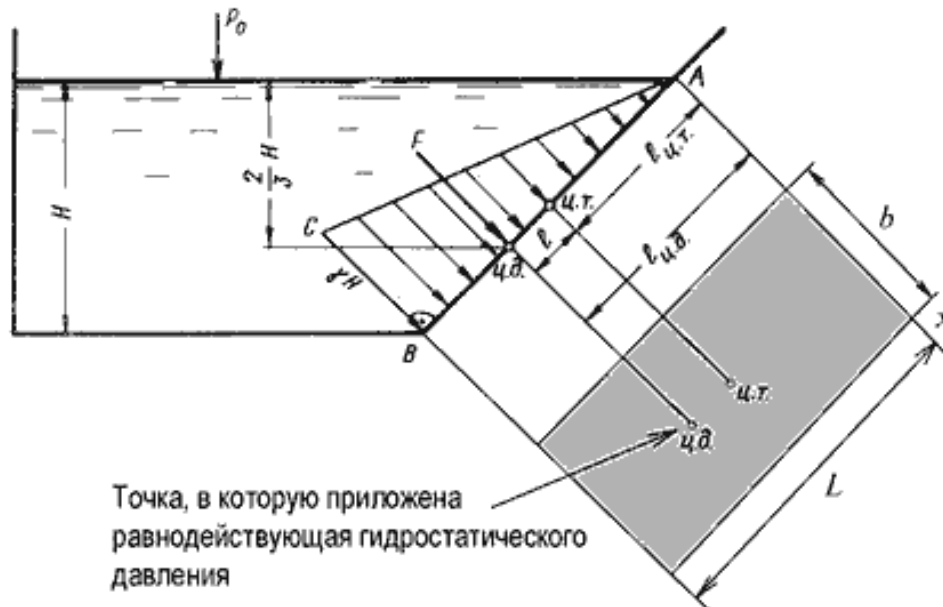


Рисунок 2.3 - Схема к определению равнодействующей гидростатического давления на плоскую поверхность

Согласно первому свойству гидростатического давления, оно всегда направлено по нормали к ограждающей поверхности. Следовательно, гидростатическое давление в точке В, величина которого равна  $\gamma H$ , надо направлять перпендикулярно к стенке АВ. Соединив точку А с концом отрезка  $\gamma H$ , получим треугольную эпюру распределения давления АВС с прямым углом в точке В.

В частном случае, когда стенка имеет форму прямоугольника размерами  $bL$  и одна из его сторон лежит на свободной поверхности с атмосферным давлением, центр давления ц.д. находится на расстоянии  $b/3$  от нижней стороны.

## 2.4 Давление жидкости на цилиндрическую поверхность

Пусть жидкость заполняет резервуар, правая стенка которого представляет собой цилиндрическую криволинейную поверхность АВС (рис.2.4), простирающуюся в направлении читателя на ширину  $b$ . Восстановим из точки А перпендикуляр АО к свободной поверхности жидкости. Объем жидкости в отсеке АОСВ находится в равновесии. Это значит, что силы, действующие на поверхности выделенного объема  $V$ , и силы веса взаимно уравновешиваются.

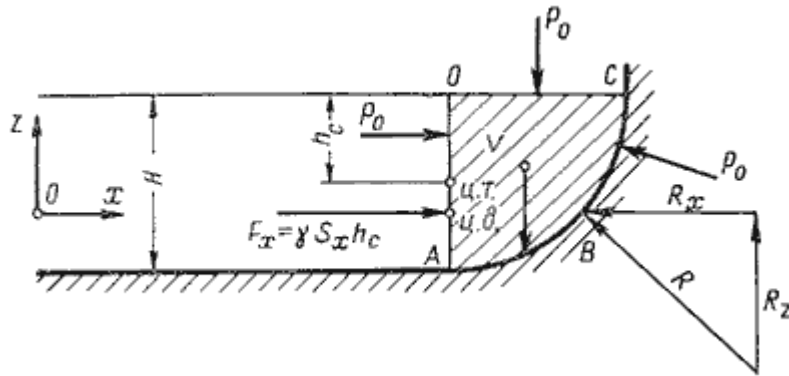


Рисунок 2.4 - Схема к определению равнодействующей гидростатического давления на цилиндрическую поверхность

Представим, что выделенный объем  $V$  представляет собой твердое тело того же удельного веса, что и жидкость (этот объем на рис.2.4 заштрихован). Левая поверхность этого объема (на чертеже вертикальная стенка  $AO$ ) имеет площадь  $S_x = bH$ , являющуюся проекцией криволинейной поверхности  $ABC$  на плоскость  $yoZ$ .

Сила гидростатического давления на площадь  $S_x$  равна  $F_x = \gamma S_x h_c$ .

С правой стороны на отсек будет действовать реакция  $R$  цилиндрической поверхности. Пусть точка приложения и направление этой реакции будут таковы, как показано на рис.2.4. Реакцию  $R$  разложим на две составляющие  $R_x$  и  $R_z$ .

Из действующих поверхностных сил осталось учесть только давление на свободной поверхности  $P_0$ . Если резервуар открыт, то естественно, что давление  $P_0$  одинаково со всех сторон и поэтому взаимно уравновешивается.

На отсек  $ABCO$  будет действовать сила собственного веса  $G = \gamma V$ , направленная вниз.

## 2.5 Закон Архимеда и его приложение

Тело, погруженное (полностью или частично) в жидкость, испытывает со стороны жидкости суммарное давление, направленное снизу вверх и равное весу жидкости в объеме погруженной части тела.

Существующая теория плавающего тела довольно обширна, поэтому мы ограничимся рассмотрением лишь гидравлической сущности этой теории.

Способность плавающего тела, выведенного из состояния равновесия, вновь возвращаться в это состояние называется устойчивостью. Вес жидкости, взятой в объеме погруженной части судна называют водоизмещением, а точку приложения равнодействующей давления (т.е. центр давления) - центром водоизмещения. При нормальном положении судна центр тяжести  $S$  и центр водоизмещения  $d$  лежат на одной вертикальной прямой  $O'-$

$O''$ , представляющей ось симметрии судна и называемой осью плавания (рис.2.5).

Пусть под влиянием внешних сил судно наклонилось на некоторый угол  $\alpha$ , часть судна  $KLM$  вышла из жидкости, а часть  $K'L'M'$ , наоборот, погрузилось в нее. При этом получили новое положение центра водоизмещения  $d'$ . Приложим к точке  $d'$  подъемную силу  $R$  и линию ее действия продолжим до пересечения с осью симметрии  $O'-O''$ . Полученная точка  $m$  называется метacentром, а отрезок  $mC = h$  называется метacentрической высотой. Будем считать  $h$  положительным, если точка  $m$  лежит выше точки  $C$ , и отрицательным - в противном случае.

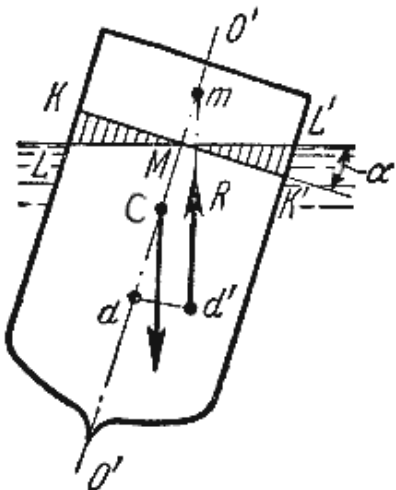


Рисунок 2.5 - Поперечный профиль судна

Теперь рассмотрим условия равновесия судна:

1) если  $h > 0$ , то судно возвращается в первоначальное положение; 2) если  $h = 0$ , то это случай безразличного равновесия; 3) если  $h < 0$ , то это случай неустойчивого равновесия, при котором продолжается дальнейшее опрокидывание судна.

Следовательно, чем ниже расположен центр тяжести и, чем больше метacentрическая высота, тем больше будет остойчивость судна.

## 2.6 Поверхности равного давления

Как уже отмечалось выше, поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется поверхностью уровня или поверхностью равного давления. При неравномерном или непрямолинейном движении на частицы жидкости кроме силы тяжести действуют еще и силы инерции, причем если они постоянны по времени, то жидкость принимает новое положение равновесия. Такое равновесие жидкости называется относительным покоем.

Рассмотрим два примера такого относительного покоя.

В первом примере определим поверхности уровня в жидкости, находящейся в цистерне, в то время как цистерна движется по горизонтальному пути с постоянным ускорением  $a$  (рис.2.6).

К каждой частице жидкости массы  $m$  должны быть в этом случае приложены ее вес  $G = mg$  и сила инерции  $P_i$ , равная по величине  $ma$ .

Так как свободная поверхность, как поверхность равного давления, должна быть нормальна к указанной равнодействующей, то она в данном случае представит собой уже не горизонтальную плоскость, а наклонную, составляющую угол  $\alpha$  с горизонтом.



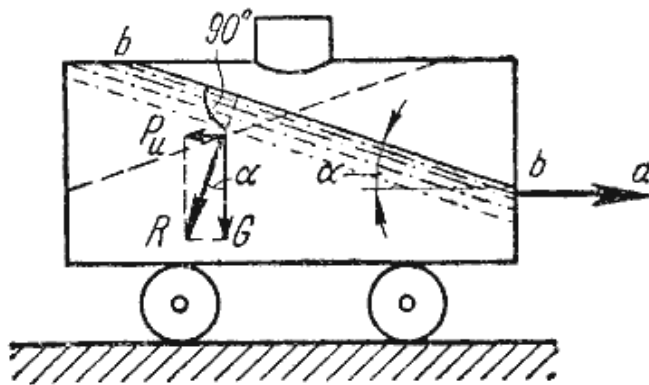


Рисунок 2.6 - Движение цистерны с ускорением

Учитывая, что величина этого угла зависит только от ускорений, приходим к выводу, что положение свободной поверхности не будет зависеть от рода находящейся в цистерне жидкости.

Любая другая поверхность уровня в жидкости также будет плоскостью, наклоненной к горизонту под углом  $\alpha$ .

Если бы движение цистерны было не равноускоренным, а равнозамедленным, направление ускорения изменилось бы на обратное, и наклон свободной поверхности обратился бы в другую сторону (см. рис.2.6, пунктир).

В качестве второго примера рассмотрим часто встречающийся в практике случай относительного покоя жидкости во вращающихся сосудах (например, в сепараторах и центрифугах, применяемых для разделения жидкостей). В этом случае (рис.2.7) на любую частицу жидкости при ее относительном равновесии действуют массовые силы: сила тяжести  $G = mg$  и центробежная сила  $P_u = m\omega^2 r$ , где  $r$  - расстояние частицы от оси вращения, а  $\omega$  - угловая скорость вращения сосуда.

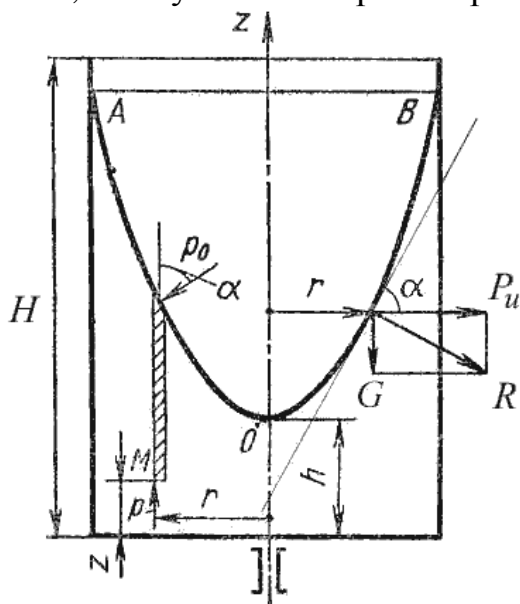


Рисунок 2.7 - Вращение сосуда с жидкостью

Поверхность жидкости также должна быть нормальна в каждой точке к равнодействующей этих сил  $R$  и представит собой параболоид вращения. Из чертежа находим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_u}{G} = \frac{m\omega^2 r}{mg}$$

С другой стороны:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dz}{dr}$$

В точке пересечения кривой АОВ с осью вращения  $r=0, z=h=C$ , поэтому окончательно будем иметь

$$z = h + \frac{\omega^2 r^2}{2g}$$

т.е. кривая АОВ является параболой, а свободная поверхность жидкости параболоидом. Такую же форму имеют и другие поверхности уровня.

Для определения закона изменения давления во вращающейся жидкости в функции радиуса и высоты выделим вертикальный цилиндрический объем жидкости с основанием в виде элементарной горизонтальной площадки  $dS$  (точка М) на произвольном радиусе  $r$  и высоте  $z$  и запишем условие его равновесия в вертикальном направлении.

### 3 ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ

Гидродинамика - раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкости и ее взаимодействие с неподвижными и подвижными поверхностями.

Если отдельные частицы абсолютно твердого тела жестко связаны между собой, то в движущейся жидкой среде такие связи отсутствуют. Движение жидкости состоит из чрезвычайно сложного перемещения отдельных молекул.

#### 3.1 Основные понятия о движении жидкости

Живым сечением  $\omega$  ( $m^2$ ) называют площадь поперечного сечения потока, перпендикулярную к направлению течения. Например, живое сечение трубы - круг (рис.3.1, а); живое сечение клапана - кольцо с изменяющимся внутренним диаметром (рис.3.1, б).

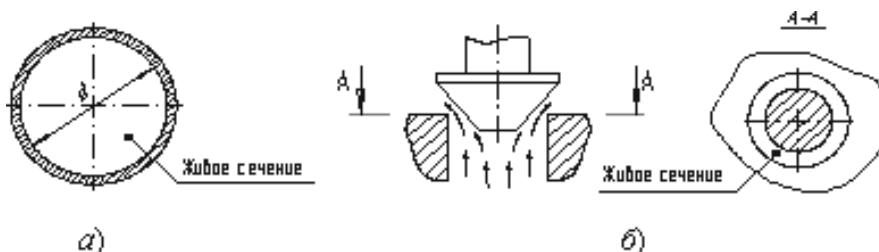


Рисунок 3.1 - Живые сечения: а - трубы, б – клапана

Смоченный периметр  $\chi$  ("хи") - часть периметра живого сечения, ограниченное твердыми стенками (рис.3.2, выделен утолщенной линией).

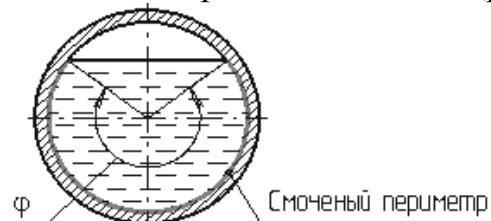


Рисунок 3.2 - Смоченный периметр

Средняя скорость потока  $v$  - скорость движения жидкости, определяемая отношением расхода жидкости  $Q$  к площади живого сечения  $\omega$ .

$$v_{\varphi} = \frac{Q}{\omega}, \quad (m/c)$$

Поскольку скорость движения различных частиц жидкости отличается друг от друга, поэтому скорость движения и усредняется. В круглой трубе, например, скорость на оси трубы максимальна, тогда как у стенок трубы она равна нулю.

Гидравлический радиус потока  $R$  - отношение живого сечения к смоченному периметру

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \text{ (м)}$$

Течение жидкости может быть установившимся и неустановившимся.

Движение, при котором скорость и давление изменяются не только от координат пространства, но и от времени, называется неустановившимся или нестационарным.

Линия тока (применяется при неустановившемся движении) это кривая, в каждой точке которой вектор скорости в данный момент времени направлены по касательной.

Трубка тока - трубчатая поверхность, образуемая линиями тока с бесконечно малым поперечным сечением. Часть потока, заключенная внутри трубки тока называется элементарной струйкой.

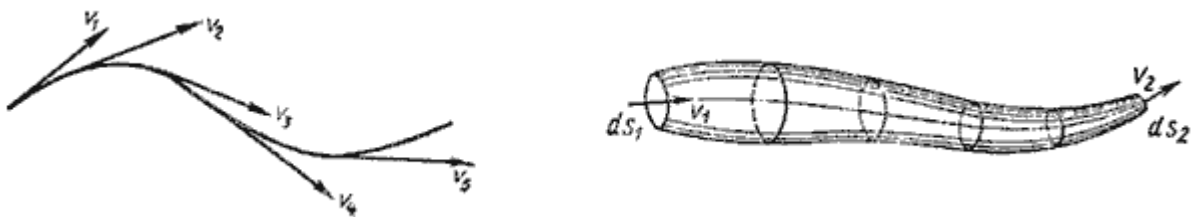


Рисунок 3.3 - Линия тока и струйка

Течение жидкости может быть напорным и безнапорным. Напорное течение наблюдается в закрытых руслах без свободной поверхности. Напорное течение наблюдается в трубопроводах с повышенным (пониженным давлением). Безнапорное - течение со свободной поверхностью, которое наблюдается в открытых руслах (реки, открытые каналы, лотки и т.п.). В данном курсе будет рассматриваться только напорное течение.

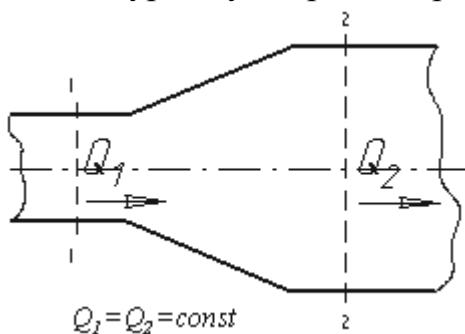


Рисунок 3.4 - Труба с переменным диаметром при постоянном расходе

Из закона сохранения вещества и постоянства расхода вытекает уравнение неразрывности течений. Представим трубу с переменным живым сечением (рис.3.4).

### 3.2 Уравнение Бернулли для идеальной жидкости

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

Рассмотрим трубопровод переменного диаметра, расположенный в пространстве под углом  $\beta$  (рис.3.5).

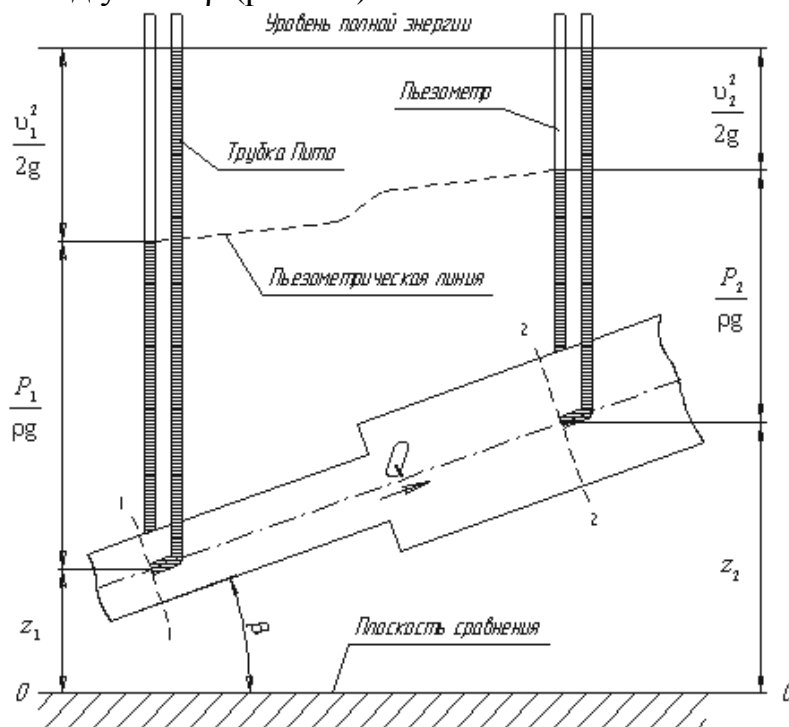


Рисунок 3.5 - Схема к выводу уравнения Бернулли для идеальной жидкости

Выберем произвольно на рассматриваемом участке трубопровода два сечения: сечение 1-1 и сечение 2-2. Вверх по трубопроводу от первого сечения ко второму движется жидкость, расход которой равен  $Q$ .

Для измерения давления жидкости применяют пьезометры - тонкостенные стеклянные трубки, в которых жидкость поднимается на высоту. В каждом сечении установлены пьезометры, в которых уровень жидкости поднимается на разные высоты.

Кроме пьезометров в каждом сечении 1-1 и 2-2 установлена трубка, загнутый конец которой направлен навстречу потоку жидкости, которая называется трубкой Пито. Жидкость в трубках Пито также поднимается на разные уровни, если отсчитывать их от пьезометрической линии.

Пьезометрическую линию можно построить следующим образом. Если между сечением 1-1 и 2-2 поставить несколько таких же пьезометров и через показания уровней жидкости в них провести кривую, то мы получим ломаную линию (рис.3.5).

Однако высота уровней в трубках Пито относительно произвольной горизонтальной прямой 0-0, называемой плоскостью сравнения, будет одинакова.

Если через показания уровней жидкости в трубках Пито провести линию, то она будет горизонтальна, и будет отражать уровень полной энергии трубопровода.

Для двух произвольных сечений 1-1 и 2-2 потока идеальной жидкости уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{const}$$

Так как сечения 1-1 и 2-2 взяты произвольно, то полученное уравнение можно переписать иначе:

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{const}$$

и прочитать так: сумма трех членов уравнения Бернулли для любого сечения потока идеальной жидкости есть величина постоянная.

### 3.3 Уравнение Бернулли для реальной жидкости

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости несколько отличается от уравнения

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{const}$$

Дело в том, что при движении реальной вязкой жидкости возникают силы трения, на преодоление которых жидкость затрачивает энергию. В результате полная удельная энергия жидкости в сечении 1-1 будет больше полной удельной энергии в сечении 2-2 на величину потерянной энергии (рис.3.6).

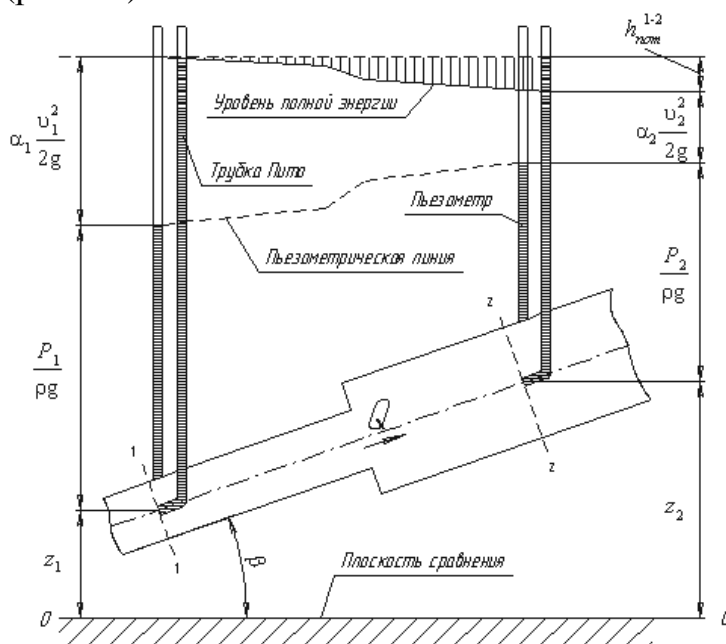


Рисунок 3.6 - Схема к выводу уравнения Бернулли для реальной жидкости

Из рисунка 3.6 видно, что по мере движения жидкости от сечения 1-1 до сечения 2-2 потерянный напор все время увеличивается (потерянный напор выделен вертикальной штриховкой). Таким образом, уровень первоначальной энергии, которой обладает жидкость в первом сечении, для второго сечения будет складываться из четырех составляющих: геометрической высоты, пьезометрической высоты, скоростной высоты и потерянного напора между сечениями 1-1 и 2-2.

С помощью уравнения Бернулли решается большинство задач практической гидравлики. Для этого выбирают два сечения по длине потока, таким образом, чтобы для одного из них были известны величины  $P$ ,  $\rho$ ,  $g$ , а для другого сечения одна или величины подлежали определению. При двух неизвестных для второго сечения используют уравнение постоянства расхода жидкости  $v_1\omega_1 = v_2\omega_2$ .

### 3.4 Измерение скорости потока и расхода жидкости

Для измерения скорости в точках потока широко используется работающая на принципе уравнения Бернулли трубка Пито (рис.3.7), загнутый конец которой направлен навстречу потоку. Пусть требуется измерить скорость жидкости в какой-то точке потока. Поместив конец трубки в указанную точку и составив уравнение Бернулли для сечения 1-1 и сечения, проходящего на уровне жидкости в трубке Пито получим

$$\frac{P_{ат} + \gamma h}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = H + h + \frac{P_{ат}}{\gamma} \quad \text{или} \quad v = \sqrt{2gH}$$

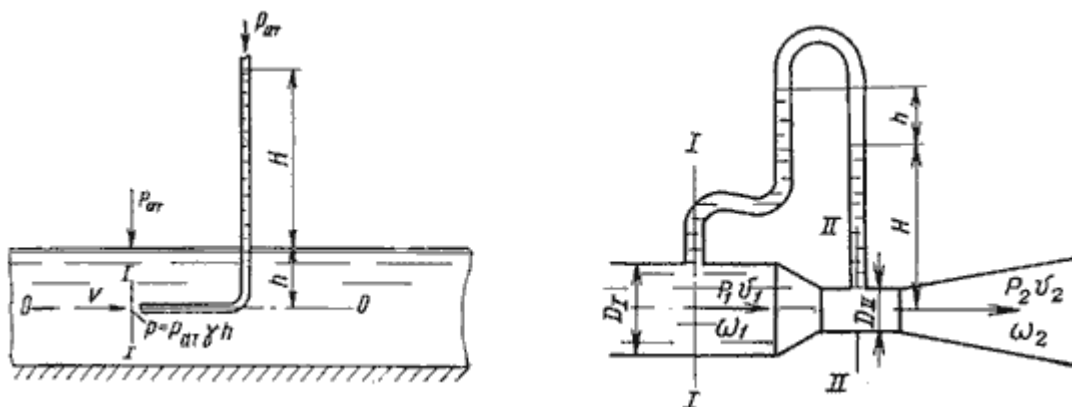


Рисунок 3.7 - Трубка Пито и расходомер Вентури

Для измерения расхода жидкости в трубопроводах часто используют расходомер Вентури, действие которого основано так же на принципе уравнения Бернулли. Расходомер Вентури состоит из двух конических насадков с цилиндрической вставкой между ними (рис.3.7). Если в сечениях I-I и II-II поставить пьезометры, то разность уровней в них будет зависеть от расхода жидкости, протекающей по трубе.

## 4 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Потери энергии (уменьшение гидравлического напора) можно наблюдать в движущейся жидкости не только на сравнительно длинных участках, но и на коротких. В одних случаях потери напора распределяются (иногда равномерно) по длине трубопровода - это линейные потери; в других - они сосредоточены на очень коротких участках, длиной которых можно пренебречь, на так называемых местных гидравлических сопротивлениях: вентили, всевозможные закругления, сужения, расширения и т.д., короче всюду, где поток претерпевает деформацию. Источником потерь во всех случаях является вязкость жидкости.

Следует заметить, что потери напора и по длине и в местных гидравлических сопротивлениях существенным образом зависят от так называемого режима движения жидкости.

### 4.1 Режимы движения жидкости

При наблюдении за движением жидкости в трубах и каналах, можно заметить, что в одном случае жидкость сохраняет определенный строй своих частиц, а в других - перемещаются бессистемно. Однако исчерпывающие опыты по этому вопросу были проведены Рейнольдсом в 1883 г. На рис. 4.1 изображена установка, аналогичная той, на которой Рейнольдс производил свои опыты.

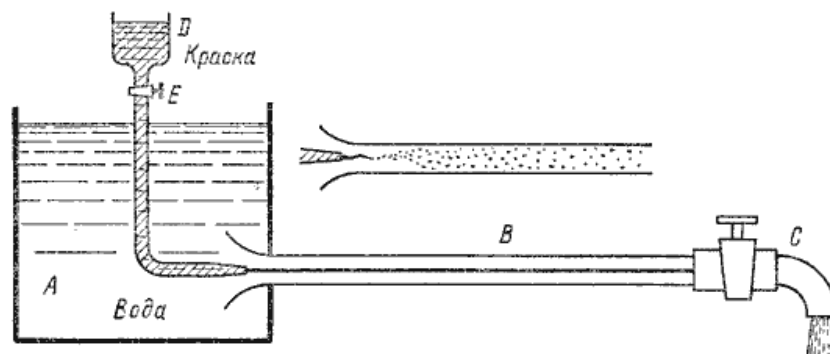


Рисунок 4.1 - Схема установки Рейнольдса

Установка состоит из резервуара А с водой, от которого отходит стеклянная труба В с краном С на конце, и сосуда Д с водным раствором краски, которая может по трубке вводиться тонкой струйкой внутрь стеклянной трубы В.

Первый случай движения жидкости. Если немного приоткрыть кран С и дать возможность воде протекать в трубе с небольшой скоростью, а затем с помощью крана Е впустить краску в поток воды, то увидим, что введенная в трубу краска не будет перемешиваться с потоком воды. Струйка краски будет отчетливо видимой вдоль всей стеклянной трубы, что указывает на слоистый характер течения жидкости и на отсутствие перемешива-

ния. Если при этом, если к трубе подсоединить пьезометр или трубку Пито, то они покажут неизменность давления и скорости по времени. Такой режим движения называется ламинарным.

Второй случай движения жидкости. При постепенном увеличении скорости течения воды в трубе путем открытия крана С картина течения вначале не меняется, но затем при определенной скорости течения наступает быстрое ее изменение. Струйка краски по выходе из трубки начинает колебаться, затем размывается и перемешивается с потоком воды, причем становятся заметными вихреобразования и вращательное движение жидкости. Пьезометр и трубка Пито при этом покажут непрерывные пульсации давления и скорости в потоке воды. Такое течение называется турбулентным (рис.4.1, вверху).

Если уменьшить скорость потока, то восстановится ламинарное течение.

Итак, ламинарным называется слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсации скорости и давления. При ламинарном течении жидкости в прямой трубе постоянного сечения все линии тока направлены параллельно оси трубы, при этом отсутствуют поперечные перемещения частиц жидкости.

Турбулентным называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений. Наряду с основным продольным перемещением жидкости наблюдаются поперечные перемещения и вращательные движения отдельных объемов жидкости. Переход от ламинарного режима к турбулентному наблюдается при определенной скорости движения жидкости. Эта скорость называется критической  $v_{кр}$ .

Значение этой скорости прямо пропорционально кинематической вязкости жидкости и обратно пропорционально диаметру трубы.

Входящий в эту формулу безразмерный коэффициент  $k$ , одинаков для всех жидкостей и газов, а также для любых диаметров труб. Этот коэффициент называется критическим числом Рейнольдса  $Re_{кр}$  и определяется следующим образом:

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} d}{\nu}$$

Как показывает опыт, для труб круглого сечения  $Re_{кр}$  примерно равно 2300.

Таким образом, критерий подобия Рейнольдса позволяет судить о режиме течения жидкости в трубе. При  $Re < Re_{кр}$  течение является ламинарным, а при  $Re > Re_{кр}$  течение является турбулентным. Точнее говоря, вполне развитое турбулентное течение в трубах устанавливается лишь при  $Re$  примерно равно 4000, а при  $Re = 2300 \dots 4000$  имеет место переходная, критическая область.

Режим движения жидкости напрямую влияет на степень гидравлического сопротивления трубопроводов.



## 4.2 Кавитация

В некоторых случаях при движении жидкости в закрытых руслах происходит явление, связанное с изменением агрегатного состояния жидкости, т.е. превращение ее в пар с выделением из жидкости растворенных в ней газов.

Наглядно это явление можно продемонстрировать на простом устройстве, состоящим из трубы, на отдельном участке которой установлена прозрачная трубка Вентури (рис.4.2). Вода под давлением движется от сечения 1-1 через сечение 2-2 к сечению 3-3. Как видно из рисунка, сечение 2-2 имеет меньший диаметр. Скорость течения жидкости в трубе можно изменять, например, установленным после сечения 3-3 краном.

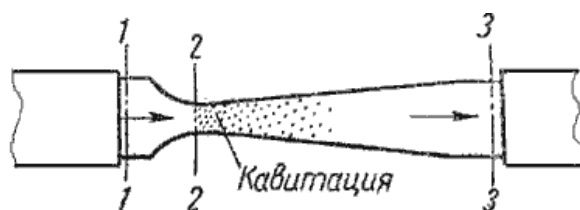


Рисунок 4.2 - Схема трубки для демонстрации кавитации

При небольшой скорости никаких видимых изменений в движении жидкости не происходит. При увеличении скорости движения жидкости в узком сечении трубки Вентури 2-2 появляется отчетливая зона с образованием пузырьков газа. Образуется область местного кипения, т.е. образование пара с выделением растворенного в воде газа. Далее при подходе жидкости к сечению 3-3 это явление исчезает.

Это явление обусловлено следующим. Известно, что при движении жидкой или газообразной среды, давление в ней падает. Причем, чем выше скорость движения среды, тем давление в ней ниже. Поэтому, при течении жидкости через местное сужение 2-2, согласно уравнению неразрывности течений, увеличивается скорость с одновременным падением давления в этом месте. Если абсолютное давление при этом достигает значения равного давлению насыщенных паров жидкости при данной температуре или значения равного давлению, при котором начинается выделение из нее растворимых газов, то в данном месте потока наблюдается интенсивное парообразование (кипение) и выделение газов. Такое явление называется кавитацией.

При дальнейшем движении жидкости к сечению 3-3, пузырьки исчезают, т.е. происходит резкое уменьшение их размеров. В то время, когда пузырек исчезает (схлопывается), в точке его схлопывания происходит резкое увеличение давления, которое передается на соседние объемы жидкости и через них на стенки трубопровода. Таким образом, от таких многочисленных местных повышений давлений (гидроударов), возникает вибрация.

Таким образом, кавитация - это местное нарушение сплошности течения с образованием паровых и газовых пузырей (каверн), обусловленное местным падением давления в потоке.

Кавитация в обычных случаях является нежелательным явлением, и ее не следует допускать в трубопроводах и других элементах гидросистем. Кавитация возникает в кранах, вентилях, задвижках, жиклерах и т.д.

Кавитация может иметь место в гидромашинах (насосах и гидротурбинах), снижая при этом их коэффициент полезного действия, а при длительном воздействии кавитации происходит разрушение деталей, подверженных вибрации. Кроме этого разрушаются стенки трубопроводов, уменьшается их пропускная способность вследствие уменьшения живого сечения трубы.

### 4.3 Потери напора при ламинарном течении жидкости

Как показывают исследования, при ламинарном течении жидкости в круглой трубе максимальная скорость находится на оси трубы. У стенок трубы скорость равна нулю, т.к. частицы жидкости покрывают внутреннюю поверхность трубопровода тонким неподвижным слоем. От стенок трубы к ее оси скорости нарастают плавно. График распределения скоростей по поперечному сечению потока представляет собой параболоид вращения, а сечение параболоида осевой плоскостью - квадратичную параболу (рис.4.3).

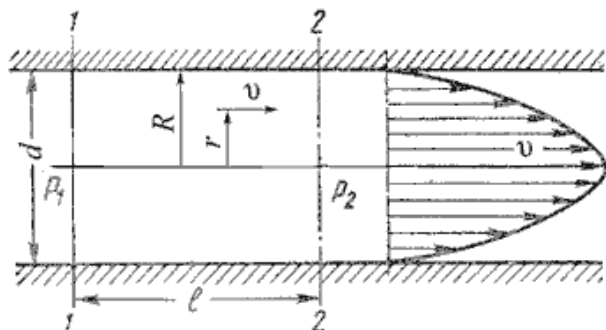


Рисунок 4.3 - Схема для рассмотрения ламинарного потока

Теперь определим расход жидкости при ламинарном течении в круглой трубе. Так как эпюра распределения скоростей в круглой трубе имеет вид параболоида вращения с максимальным значением скорости в центре трубы, то расход жидкости численно равен объему этого параболоида.

### 4.4 Потери напора при турбулентном течении жидкости

Как было указано в п.4.1, для турбулентного течения характерно перемешивание жидкости, пульсации скоростей и давлений. Если с помощью особо чувствительного прибора-самописца измерять пульсации, например, скорости по времени в фиксированной точке потока, то получим картину, подобную показанной на рис.4.4. Скорость беспорядочно колеблется около

некоторого осредненного по времени значения  $u_{оср}$ , которое в данном случае остается постоянным.

Характер линий тока в трубе в данный момент времени отличается большим разнообразием (рис.4.5).

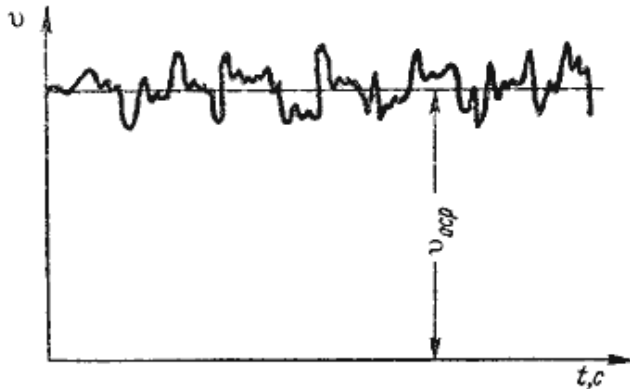


Рисунок 4.4 - Пульсация скорости в турбулентном потоке

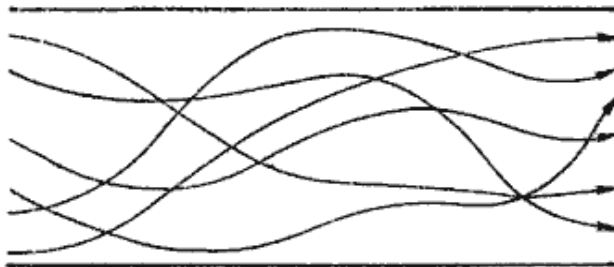


Рисунок 4.5 - Характер линий тока в турбулентном потоке

При турбулентном режиме движения жидкости в трубах эпюра распределения скоростей имеет вид, показанный на рис. 4.6. В тонком пристенном слое толщиной  $\delta$  жидкость течет в ламинарном режиме, а остальные слои текут в турбулентном режиме, и называются турбулентным ядром. Таким образом, строго говоря, турбулентного движения в чистом виде не существует. Оно сопровождается ламинарным движением у стенок, хотя слой  $\delta$  с ламинарным режимом весьма мал по сравнению с турбулентным ядром.

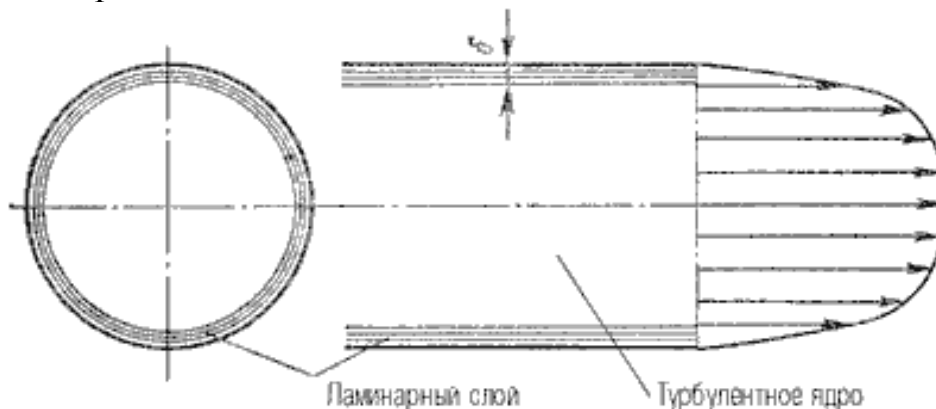


Рисунок 4.6 - Модель турбулентного режима движения жидкости

## 4.5 Местные гидравлические сопротивления

Все гидравлические потери энергии делятся на два типа: потери на трение по длине трубопроводов (рассмотрены в п.4.3 и 4.4) и местные потери, вызванные такими элементами трубопроводов, в которых вследствие изменения размеров или конфигурации русла происходит изменение скорости потока, отрыв потока от стенок русла и возникновение вихреобразования.

Простейшие местные гидравлические сопротивления можно разделить на расширения, сужения и повороты русла, каждое из которых может быть внезапным или постепенным. Более сложные случаи местного сопротивления представляют собой соединения или комбинации перечисленных простейших сопротивлений.

Рассмотрим простейшие местные сопротивления при турбулентном режиме течения в трубе.

1. Внезапное расширение русла. Потеря напора (энергии) при внезапном расширении русла расходуется на вихреобразование, связанное с отрывом потока от стенок, т.е. на поддержание вращательного непрерывного движения жидких масс с постоянным их обновлением.

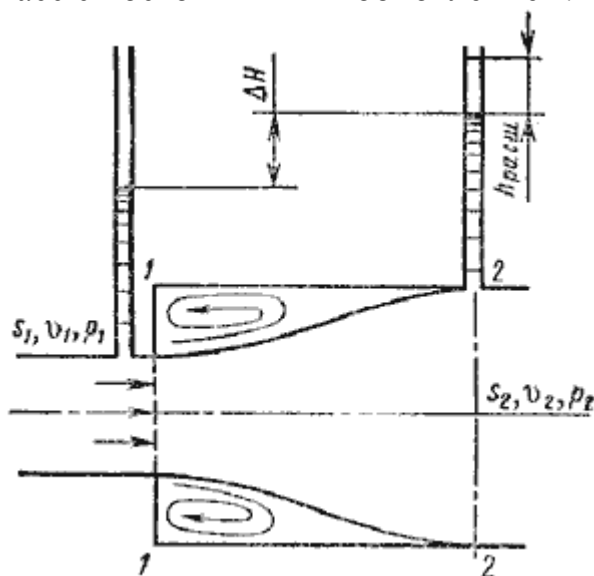


Рисунок 4.9 - Внезапное расширение трубы

При внезапном расширении русла (трубы) (рис.4.9) поток срывается с угла и расширяется не внезапно, как русло, а постепенно, причем в кольцевом пространстве между потоком и стенкой трубы образуются вихри, которые и являются причиной потерь энергии. Рассмотрим два сечения потока: 1-1 - в плоскости расширения трубы и 2-2 - в том месте, где поток, расширившись, заполнил все сечение широкой трубы. Так как поток между рассматриваемыми сечениями расширяется, то скорость его уменьшается, а давление возрастает. Поэтому второй пьезометр показывает высоту на

$\Delta H$  большую, чем первый; но если бы потеря напора в данном месте не было, то второй пьезометр показал бы высоту большую еще на  $h_{расш}$ .

2. Постепенное расширение русла. Постепенно расширяющаяся труба называется диффузором (рис.4.10). Течение скорости в диффузоре сопровождается ее уменьшением и увеличением давления, а следовательно, преобразованием кинетической энергии жидкости в энергию давления. В диффузоре, так же как и при внезапном расширении русла, происходит отрыв основного потока от стенки и вихреобразование. Интенсивность этих явлений возрастает с увеличением угла расширения диффузора  $\alpha$ .

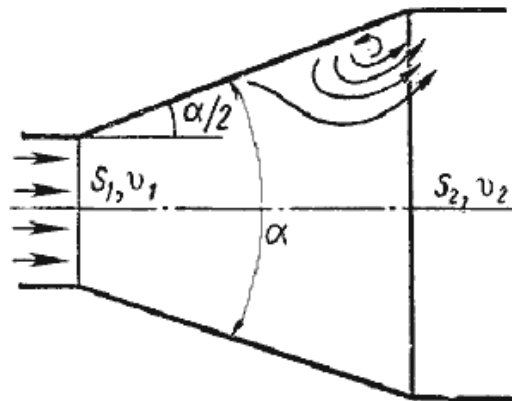


Рисунок 4.10 - Постепенное расширение трубы

Кроме того, в диффузоре имеются и обычные потери на трение, подобные тем, которые возникают в трубах постоянного сечения.

3. Внезапное сужение русла. В этом случае потеря напора обусловлена трением потока при входе в более узкую трубу и потерями на вихреобразование, которые образуются в кольцевом пространстве вокруг суженой части потока.

4. Постепенное сужение русла. Данное местное сопротивление представляет собой коническую сходящуюся трубу, которая называется конфузуром.

Небольшое вихреобразование и отрыв потока от стенки с одновременным сжатием потока возникает лишь на выходе из конфузуров в месте соединения конической трубы с цилиндрической. Закруглением входного угла можно значительно уменьшить потерю напора при входе в трубу. Конфузур с плавно сопряженными цилиндрическими и коническими частями называется соплом (рис.4.11).

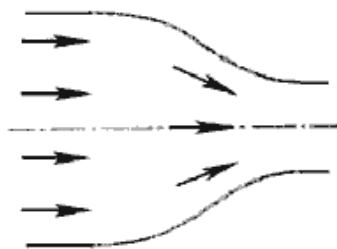


Рисунок 4.11 – Сопло

5. Внезапный поворот трубы (колени). Данный вид местного сопротивления вызывает значительные потери энергии, т.к. в нем происходят отрыв потока и вихреобразования, причем потери тем больше, чем больше угол  $\delta$ .

6. Постепенный поворот трубы (закругленное колено или отвод). Плавность поворота значительно уменьшает интенсивность вихреобразования, а следовательно, и сопротивление отвода по сравнению с коленом.

Все выше изложенное относится к турбулентному движению жидкости. При ламинарном движении местные сопротивления играют малую роль при определении общего сопротивления трубопровода. Кроме этого закон сопротивления при ламинарном режиме является более сложным и исследован в меньшей степени.

## **5 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОСТЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

При расчетах напорных трубопроводов основной задачей является либо определение пропускной способности (расхода), либо потери напора на том или ином участке, равно как и на всей длине, либо диаметра трубопровода на заданных расходе и потерях напора.

В практике трубопроводы делятся на короткие и длинные. К первым относятся все трубопроводы, в которых местные потери напора превышают 5...10% потерь напора по длине. При расчетах таких трубопроводов обязательно учитывают потери напора в местных сопротивлениях. К ним относят, к примеру, маслопроводы объемных передач.

Ко вторым относятся трубопроводы, в которых местные потери меньше 5...10% потерь напора по длине. Их расчет ведется без учета местных потерь. К таким трубопроводам относятся, например, магистральные водоводы, нефтепроводы.

Учитывая гидравлическую схему работы длинных трубопроводов, их можно разделить также на простые и сложные. Простыми называются последовательно соединенные трубопроводы одного или различных сечений, не имеющих никаких ответвлений. К сложным трубопроводам относятся системы труб с одним или несколькими ответвлениями, параллельными ветвями и т.д. К сложным относятся и так называемые кольцевые трубопроводы.

### **5.1 Простой трубопровод постоянного сечения**

Жидкость по трубопроводу движется благодаря тому, что ее энергия в начале трубопровода больше, чем в конце. Этот перепад уровней энергии может создаваться несколькими способами: работой насоса, разностью уровней жидкости, давлением газа.

Рассмотрим простой трубопровод постоянного сечения, который расположен произвольно в пространстве (рис. 5.1), имеет общую длину  $l$  и диаметр  $d$ , а также содержит ряд местных сопротивлений (вентиль, фильтр и обратный клапан). В начальном сечении трубопровода 1-1 геометрическая высота равна  $z_1$  и избыточное давление  $P_1$ , а в конечном сечении 2-2 – соответственно  $z_2$  и  $P_2$ . Скорость потока в этих сечениях вследствие постоянства диаметра трубы одинакова и равна  $v$ .

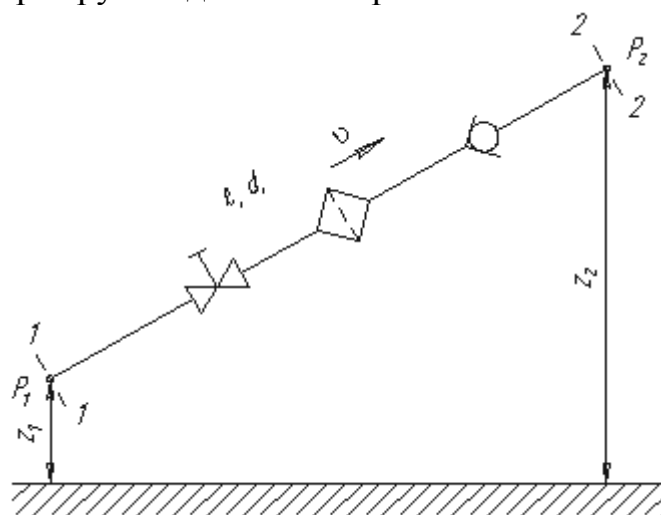


Рисунок 5.1 - Схема простого трубопровода

При ламинарном течении эта кривая изображается прямой линией (рис.5.2, а), при турбулентном - параболой с показателем степени равном двум (рис.5.2, б).

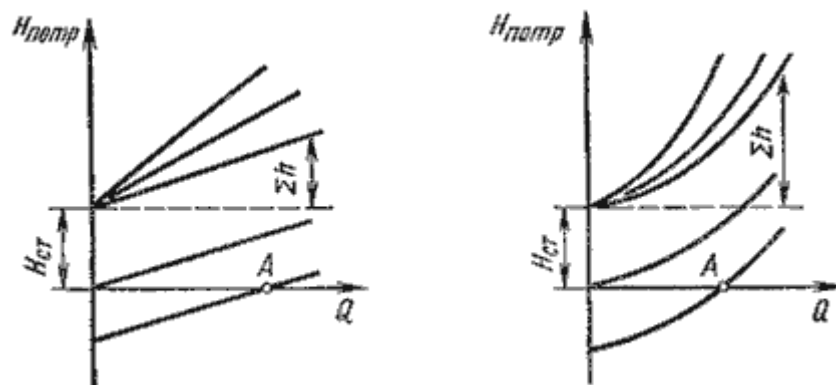


Рисунок 5.2 - Зависимости потребных напоров от расхода жидкости в трубопроводе

Крутизна кривых потребного напора зависит от сопротивления трубопровода  $K$  и возрастает с увеличением длины трубопровода и уменьшением диаметра, а также с увеличением местных гидравлических сопротивлений.

Величина статического напора  $H_{ст}$  положительна в том случае, когда жидкость движется вверх или в полость с повышенным давлением, и отри-

цательна при опускании жидкости или движении в полость с пониженным давлением. Точка пересечения кривой требуемого напора с осью абсцисс (точка А) определяет расход при движении жидкости самотеком. Требуемый напор в этом случае равен нулю.

Иногда вместо кривых требуемого напора удобнее пользоваться характеристиками трубопровода. Характеристикой трубопровода называется зависимость суммарной потери напора (или давления) в трубопроводе от расхода.

## 5.2 Соединения простых трубопроводов

Простые трубопроводы могут соединяться между собой, при этом их соединение может быть последовательным или параллельным.

Последовательное соединение. Возьмем несколько труб различной длины, разного диаметра и содержащих разные местные сопротивления, и соединим их последовательно (рис. 5.3, а).

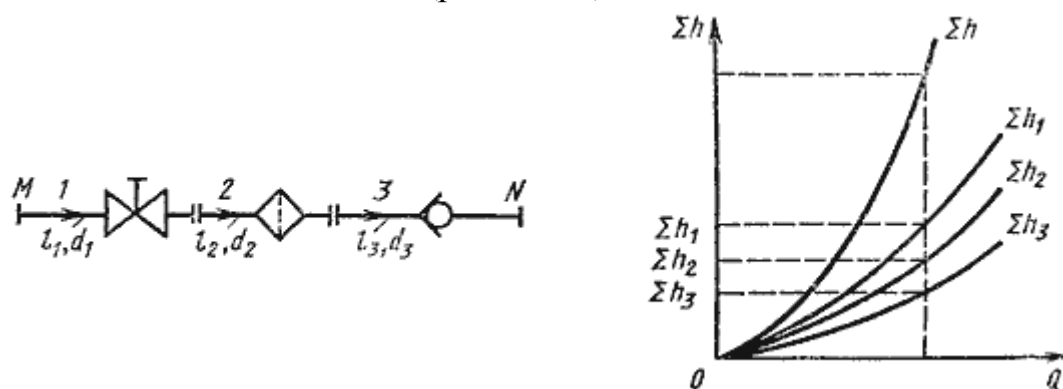


Рисунок 5.3 - Последовательное соединение трубопроводов

## 5.3 Сложные трубопроводы

Сложный трубопровод в общем случае составлен из простых трубопроводов с последовательным и параллельным их соединением (рис. 5.4, а) или с разветвлениями (рис. 5.4, б).

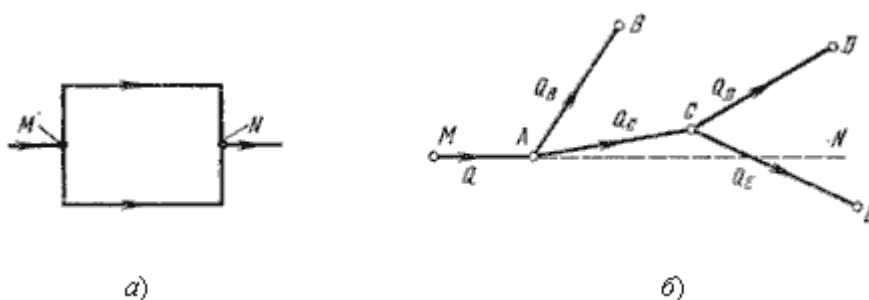


Рисунок 5.4 - Схемы сложных трубопроводов



Сложный кольцевой трубопровод. Представляет собой систему смежных замкнутых контуров, с отбором жидкости в узловых точках или с непрерывной раздачей жидкости на отдельных участках (рис. 6.5).

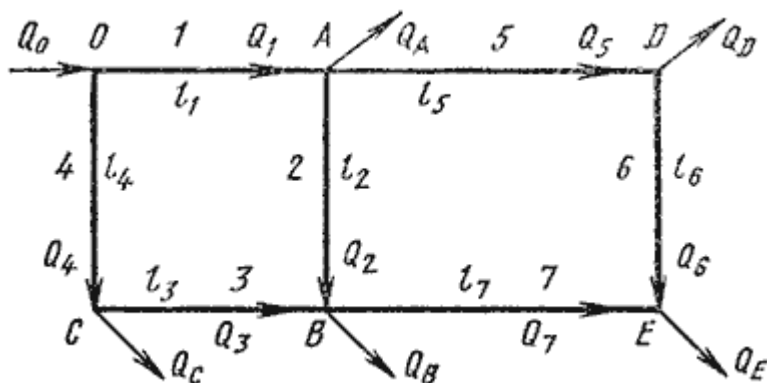


Рисунок 5.5 - Схема сложного кольцевого трубопровода

Задачи для таких трубопроводов решают аналогичным методом с применением электроаналогий (закон Кирхгофа). При этом основываются на двух обязательных условиях. Первое условие - баланс расходов, т.е. равенство притока и оттока жидкости для каждой узловой точки. Второе условие - баланс напоров, т.е. равенство нулю алгебраической суммы потерь напора для каждого кольца (контура) при подсчете по направлению движения часовой стрелки или против нее.

Для расчета таких трубопроводов типичной является следующая задача. Дан максимальный напор в начальной точке, т.е. в точке O, минимальный напор в наиболее удаленной точке E, расходы во всех шести узлах и длины семи участков. Требуется определить диаметры трубопроводов на всех участках.

#### 5.4 Трубопроводы с насосной подачей жидкостей

Как уже отмечалось выше, перепад уровней энергии, за счет которого жидкость течет по трубопроводу, может создаваться работой насоса, что широко применяется в машиностроении. Рассмотрим совместную работу трубопровода с насосом и принцип расчета трубопровода с насосной подачей жидкости.

Трубопровод с насосной подачей жидкости может быть разомкнутым, т.е. по которому жидкость перекачивается из одной емкости в другую (рис. 5.6, а), или замкнутым (кольцевым), в котором циркулирует одно и то же количество жидкости (рис. 5.6, б).

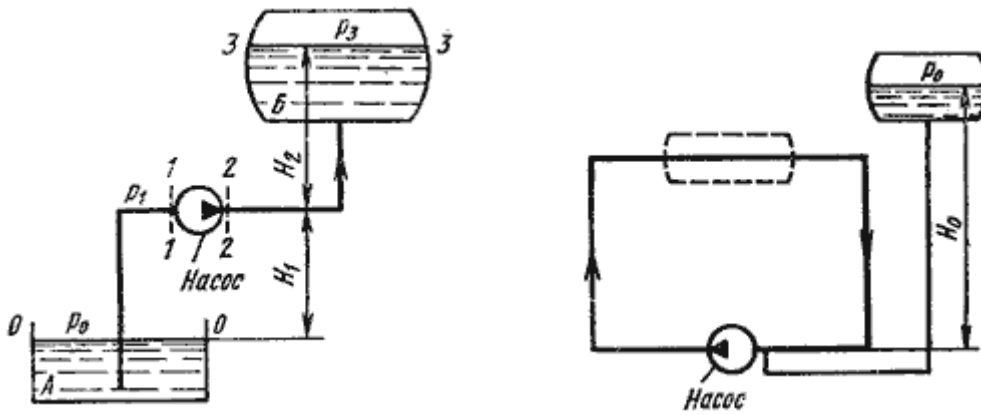


Рисунок 5.6 - Трубопроводы с насосной подачей

Рассмотрим трубопровод, по которому перекачивают жидкость из нижнего резервуара с давлением  $P_0$  в другой резервуар с давлением  $P_3$  (рис. 5.6, а). Высота расположения оси насоса  $H_1$  называется геометрической высотой всасывания, а трубопровод, по которому жидкость поступает к насосу, всасывающим трубопроводом или линией всасывания. Высота расположения конечного сечения трубопровода  $H_2$  называется геометрической высотой нагнетания, а трубопровод, по которому жидкость движется от насоса, напорным или линией нагнетания.

## 6 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Гидравлическими машинами называются машины, которые сообщают протекающей через них жидкости механическую энергию (насос), либо получают от жидкости часть энергии и передают ее рабочему органу для полезного использования (гидродвигатель).

Насосы и гидромоторы применяют также в гидропередачах, назначением которых является передача механической энергии от двигателя к исполнительному органу, а также преобразование вида и скорости движения последнего посредством жидкости.

Гидропередачи по сравнению с механическими передачами (муфты, коробки скоростей, редукторы и т.д.) имеют следующие преимущества.

1. Плавность работы.
2. Возможность бесступенчатого регулирования скорости.
3. Меньшая зависимость момента на выходном валу от нагрузки, приложенной к исполнительному органу.
4. Возможность передачи больших мощностей.
5. Малые габаритные размеры.
6. Высокая надежность.

Эти преимущества привели к большому распространению гидропередач, несмотря на их несколько меньший, чем у механических передач КПД.

## 6.1 Лопастные насосы

В современной технике применяется большое количество разновидностей машин. Наибольшее распространение для водоснабжения населения получили лопастные насосы. Рабочим органом лопастной машины является вращающееся рабочее колесо, снабженное лопастями. Лопастные насосы делятся на центробежные и осевые.

В центробежном лопастном насосе жидкость под действием центробежных сил перемещается через рабочее колесо от центра к периферии.

На рис. 6.1 изображена простейшая схема центробежного насоса. Проточная часть насоса состоит из трех основных элементов – подвода 1, рабочего колеса 2 и отвода 3. По подводу жидкость подается в рабочее колесо из подводящего трубопровода. Рабочее колесо 2 передает жидкости энергию от приводного двигателя. Рабочее колесо состоит из двух дисков а и б, между которыми находятся лопатки в, изогнутые в сторону, противоположную направлению вращения колеса. Жидкость движется через колесо из центральной его части к периферии. По отводу жидкость отводится от рабочего колеса к напорному патрубку или, в многоступенчатых насосах, к следующему колесу.

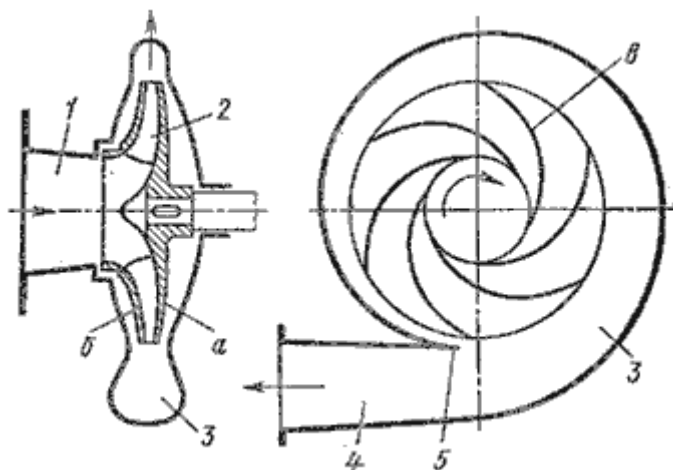


Рисунок 6.1 - Схема центробежного насоса

В осевом лопастном насосе жидкость перемещается в основном вдоль оси вращения рабочего колеса (рис. 6.2). Рабочее колесо осевого насоса похоже на винт корабля. Оно состоит из втулки 1, на которой закреплено несколько лопастей 2. Отводом насоса служит осевой направляющий аппарат 3, с помощью которого устраняется закрутка жидкости, и кинетическая энергия ее преобразуется в энергию давления. Осевые насосы применяют при больших подачах и малых давлениях.

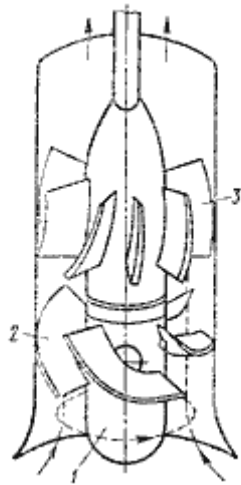


Рисунок 6.2 - Схема осевого насоса

Осевые насосы могут быть жестколопастными, в которых положение лопастей рабочего колеса не изменяется, и поворотно-лопастными, в которых положение рабочего колеса может регулироваться.

## 6.2 Поршневые насосы

Поршневые насосы относятся к числу объемных насосов, в которых перемещение жидкости осуществляется путем ее вытеснения из неподвижных рабочих камер вытеснителями. Рабочей камерой объемного насоса называют ограниченное пространство, попеременно сообщаемое со входом и выходом насоса. Вытеснителем называется рабочий орган насоса, который совершает вытеснение жидкости из рабочих камер (плунжер, поршень, диафрагма).

Классифицируются поршневые насосы по следующим показателям:

- 1) по типу вытеснителей: плунжерные, поршневые и диафрагменные;
- 2) по характеру движения ведущего звена: возвратно-поступательное движение ведущего звена; вращательное движение ведущего звена (кривошипные и кулачковые насосы);
- 3) по числу циклов нагнетания и всасывания за один двойной ход: одностороннего действия; двухстороннего действия.
- 4) по количеству поршней: однопоршневые; двухпоршневые; многопоршневые.

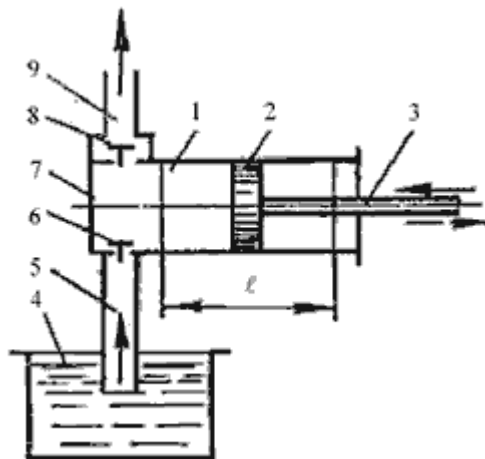


Рисунок 6.3 - Насос поршневой простого действия

Насос простого действия. Схема насоса простого действия изображена на рис. 6.3. Поршень 2 связан с кривошипно-шатунным механизмом через шток 3, в результате чего он совершает возвратно-поступательное движение в цилиндре 1. Поршень при ходе вправо создает разрежение в рабочей камере, вследствие чего всасывающий клапан 6 поднимается и жидкость из расходного резервуара 4 по всасывающему трубопроводу 5 поступает в рабочую камеру 7. При обратном ходе поршня (влево) всасывающий клапан закрывается, а нагнетательный клапан 8 открывается, и жидкость нагнетается в напорный трубопровод 9.

Для повышения производительности поршневых насосов их часто выполняют сдвоенными, строенными и т.д. Поршни таких насосов приводятся в действие от одного коленчатого вала со смещением колен.

Действительная производительность насоса  $Q$  меньше теоретической, так как возникают утечки, обусловленные несвоевременным закрытием клапанов, неплотностями в клапанах и уплотнениях поршня и штока, а также неполнотой заполнения рабочей камеры.

Отношение действительной подачи  $Q$  к теоретической  $Q_T$  называется объемным КПД поршневого насоса.

Объемный КПД - основной экономический показатель, характеризующий работу насоса.

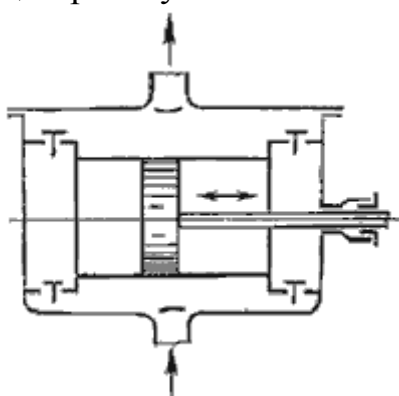


Рисунок 6.4 - Насос поршневой двойного действия

Насос двойного действия. Более равномерная и увеличенная подача жидкости, по сравнению с насосом простого действия, может быть достигнута насосом двойного действия (рис. 6.4), в котором каждому ходу поршня соответствуют одновременно процессы всасывания и нагнетания. Эти насосы выполняются горизонтальными и вертикальными, причем последние наиболее компактны.

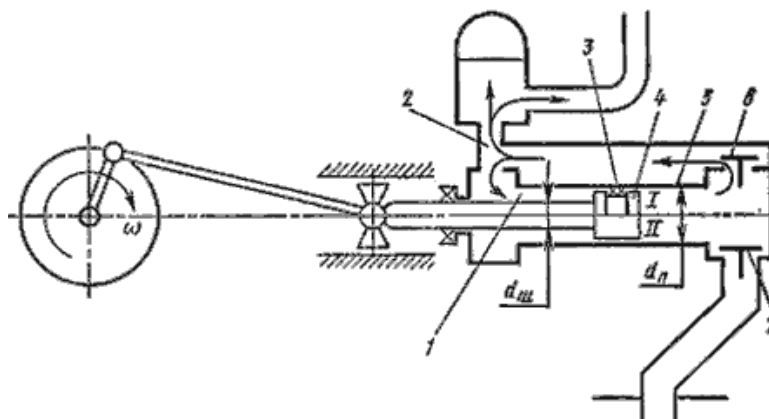


Рисунок 6.5 - Схема поршневого насоса с дифференциальным поршнем

Дифференциальный насос. В дифференциальном насосе (рис. 6.5) поршень 4 перемещается в гладко обработанном цилиндре 5. Уплотнением поршня служит сальник 3 (вариант I) или малый зазор (вариант II) со стенкой цилиндра. Насос имеет два клапана: всасывающий 7 и нагнетательный 6, а также вспомогательную камеру 1. Всасывание происходит за один ход поршня, а нагнетание за оба хода. Так, при ходе поршня влево из вспомогательной камеры в нагнетательный трубопровод 2 вытесняется объем жидкости, равный  $(F - f)l$ ; при ходе поршня вправо из основной камеры вытесняется объем жидкости, равный  $fl$ .

## ПРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшуль А.Д., Калицун В.И., Майрановский Ф.Г. и др. Примеры расчетов по гидравлике: Учебное пособие. - М.: Стройиздат, 2006. - 256 с.
2. Андреев А.Ф., Барташевич Л.В., Боглан Н.В. и др. Гидро- пневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Объемные гидро- и пневмомашинны и передачи. - Минск: Высшая школа, 2007. - 310 с.
3. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. - М.: Машиностроение, 2002. - 320 с.
4. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашинны и гидроприводы: Учебник. 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 2002. - 423 с.
5. Богданович Л.Б. Гидравлические механизмы поступательного движения: Схемы и конструкции. - М., Киев: МАШГИЗ, 2008. - 181 с.
6. Богомоллов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 2002. - 648 с.
7. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник. - М.: Машиностроение, 2003. - 301 с., ил.
8. Задачник по гидравлике / Под ред. И.И. Куколевского. - М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 2006. - 344 с.
9. Задачник по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу: Учеб. Пособие / Некрасов Б.Б., Фатеев И.В., Беленков Ю.А. и др.; Под ред. Б.Б.Некрасова. - М.: Высш.шк., 2009. - 192 с.: ил.
10. Каверзин С.В. Курсовое и дипломное проектирование по гидроприводу самоходных машин: Учебное пособие. - Красноярск: ПИК "Офсет", 1997. - 384 с.
11. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике. - К.: Техника, 1997. - 175 с.
12. Копырин М.А. Гидравлика и гидравлические машинны. - М.: Высшая школа, 2001. - 302 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ ГИДРАВЛИКИ И КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕЕ РАЗВИТИЯ .....</b>	<b>3</b>
<b>2 ОСНОВЫ ГИДРОСТАТИКИ.....</b>	<b>10</b>
<b>3 ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ.....</b>	<b>18</b>
<b>4 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....</b>	<b>23</b>
<b>5 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОСТЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....</b>	<b>30</b>
<b>6 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.....</b>	<b>34</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>38</b>

**МДК.02.01.  
ЭКСПЛУАТАЦИЯ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
(В РАЗДЕЛЕ ГИДРАВЛИКА)**

**Краткий курс лекций для студентов очной формы обучения  
специальности 131003.51 Бурение нефтяных и газовых скважин**

Краткий курс лекций разработал:  
преподаватель Кавташкина Инна Юрьевна

Подписано к печати *30.01.2014 г.*

Формат 60x84/16

Тираж

Объем **2,5** п.л.

Заказ

**50 экз.**

---

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования**

**«Югорский государственный университет»**

**НИЖНЕВАРТОВСКИЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИКУМ (филиал)**

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения**

**высшего профессионального образования**

**«Югорский государственный университет»**

Редакционно-издательский отдел

628615 Тюменская обл., Ханты-Мансийский автономный округ,

г. Нижневартовск, ул. Мира, 37.