

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

Кафедра «Автотранспортная и техносферная безопасность»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ПРОТИВОПОЖАРНОЕ
ВОДОСНАБЖЕНИЕ»

Составитель:

И.С. Коцеев

Владимир 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ ГИДРАВЛИКИ И КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕЕ РАЗВИТИЯ	3
2. ОСНОВЫ ГИДРОСТАТИКИ	10
3. ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ	21
4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ	28
5. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ, НАСАДКОВ И ИЗ-ПОД ЗАТВОРОВ ..	40
6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.....	53
7. ВОДОПОТРЕБИТЕЛИ	64
8. РУКАВНО-НАСОСНЫЕ СИСТЕМЫ	71
9. ПРОТИВОПОЖАРНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ И ПРОМЫШ- ЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	77
10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВО- ДОСНАБЖЕНИЯ.....	86
11. ЭКСПЕРТИЗА ПРОЕКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБСЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПРО- ТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ	93
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	99

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).

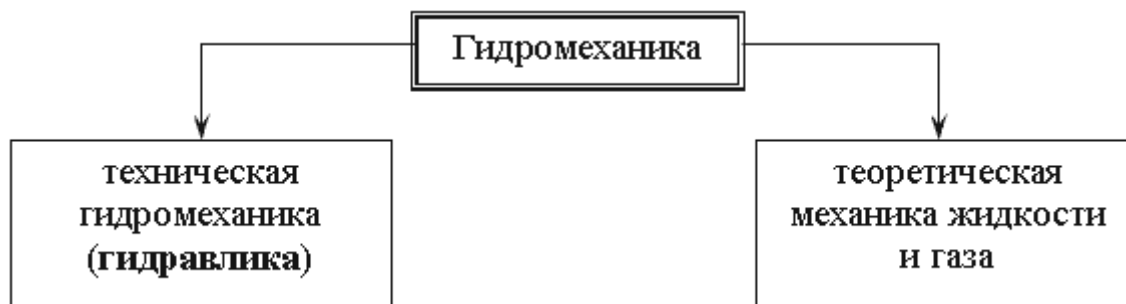


Рис. 1.1. Разделы гидромеханики

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, которые 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.).



Рис. 1.2. Виды жидкостей

Основной отличительной особенностью капельных и газообразных жидкостей является способность сжиматься (изменять объем) под воздействием 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).

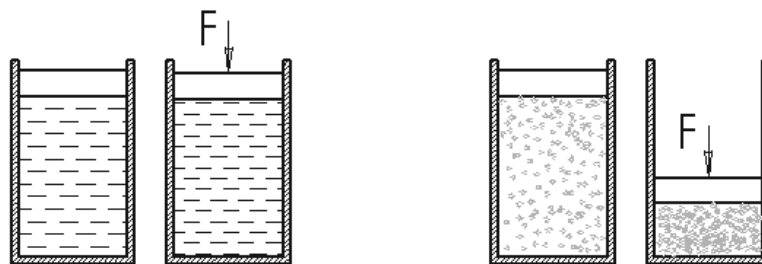


Рис. 1.3. Сжатие жидкостей и газов

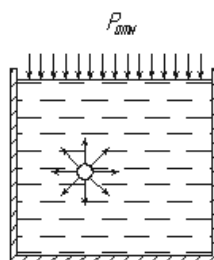


Рис. 1.4. Поверхностные силы

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 (рис.1.4). Кроме этого на свободную поверхность жидкости действует сила атмосферного давления $P_{атм}$ и силы со стороны стенок сосуда.

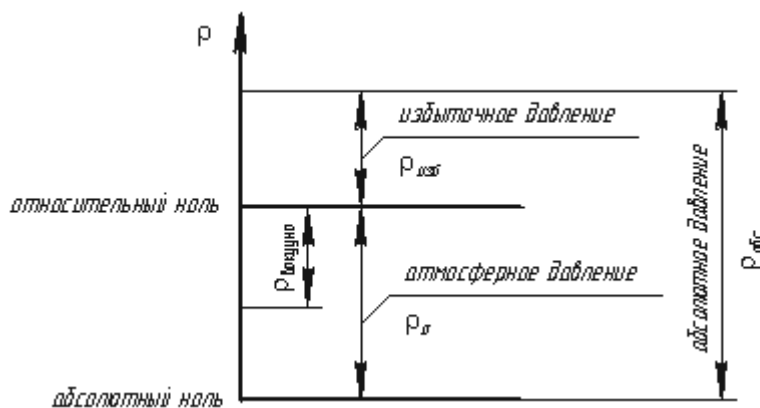
Если на жидкость действует какая-то внешняя сила, то говорят, что жидкость находится под давлением. Обычно для определения давления жидкости, вызванного воздействием на нее поверхностных сил, применяется формула

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

где F - сила, действующая на жидкость, Н (ньютоны);

S - площадь, на которую действует эта сила, м² (кв.метры).

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).



$$P_{абс} = P_{изб} + P_a;$$

$$1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}.$$

Рис. 1.5. 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 м²:

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

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/м².

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

1.3. Механические характеристики и основные свойства жидкостей

Основные механические характеристики

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 β_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.

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

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

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

3. *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.

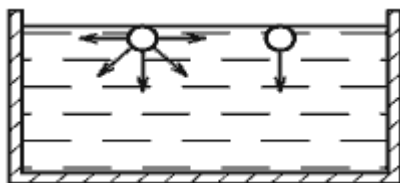


Рис. 1.6. Силы поверхностного натяжения

4. *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.

5. *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

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

где S - площадь слоев жидкости или стенки, соприкасающейся с жидкостью, м^2 , μ - динамический коэффициент вязкости, или сила вязкостного трения, d/dy - градиент скорости, перпендикулярный к поверхности сдвига.

Отсюда динамическая вязкость равна

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

где τ - касательные напряжения жидкости, $\tau = T/S$.

При течении вязкой жидкости вдоль твердой стенки происходит торможение потока, обусловленное вязкостью (рис.1.7). 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 τ .

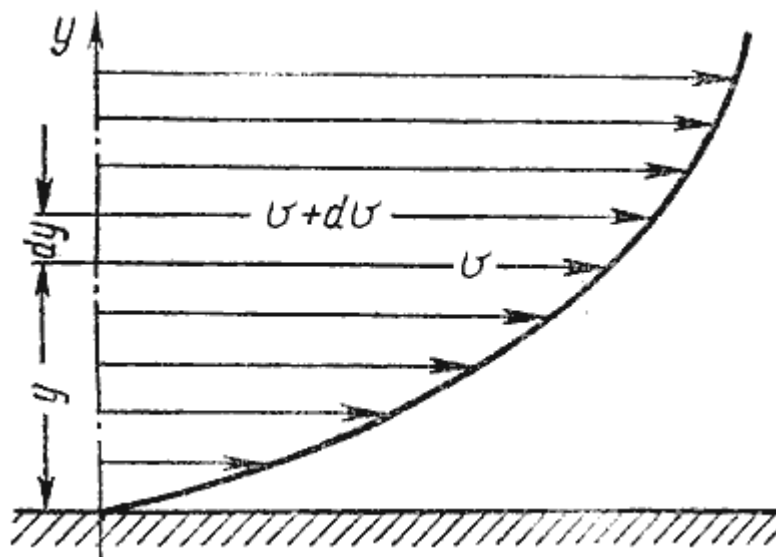


Рис. 1.7. Профиль скоростей при течении вязкой жидкости вдоль стенки

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 ν (произносится "ню") равная $1\text{ см}^2\text{/с}$ называется стоксом (Ст), а $0,01$ Ст - 1 сантостоксом (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^3 испытуемой жидкости через капилляр $d = 2,8\text{ мм}$ к времени истечения такого же объема воды при $t = 20\text{ С}$

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

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

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

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



Рис. 1.8. 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.

6. *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.

7. *Химическая и механическая стойкость.* Характеризует способность жидкости сохранять свои первоначальные физические свойства при эксплуатации и хранения.

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.

8. *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.

9. *Испаряемость жидкости.* Испаряемость свойственна всем капельным 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).

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

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

где V_{Γ} - объем растворенного газа; $V_{\text{ж}}$ - объем жидкости; k - коэффициент растворимости; P - давление; P_a - атмосферное давление.

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.

$$P_{\text{ср}} = \frac{P}{S_{abcd}}$$

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 рис.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 φ (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.

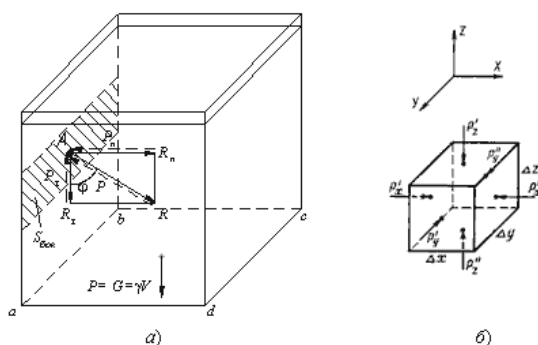


Рис. 2.1. Схема, иллюстрирующая свойства гидростатического давления а - первое свойство; б - второе свойство

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 покоя, 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 Δx , Δy , Δz (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 . Поскольку кубик находится в равновесии, то можно записать равенства

$$\begin{aligned} P'_x \Delta y \Delta z &= P''_x \Delta y \Delta z \\ P'_y \Delta x \Delta z &= P''_y \Delta x \Delta z \\ P'_z \Delta x \Delta y + \gamma \Delta x \Delta y \Delta z &= P''_z \Delta x \Delta y \end{aligned}$$

где γ - удельный вес жидкости;
 Δx , Δy , Δz - объем кубика.

Сократив полученные равенства, найдем, что

$$P'_x = P''_x; P'_y = P''_y; P'_z + \gamma \Delta z = P''_z$$

Членом третьего уравнения $\gamma \Delta z$, как бесконечно малым по сравнению с P'_z и P''_z , можно пренебречь и тогда окончательно

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

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. Третье свойство гидростатического давления может быть записано в виде

$$P = f(x, y, z)$$

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 гидростатиче-

ское 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.

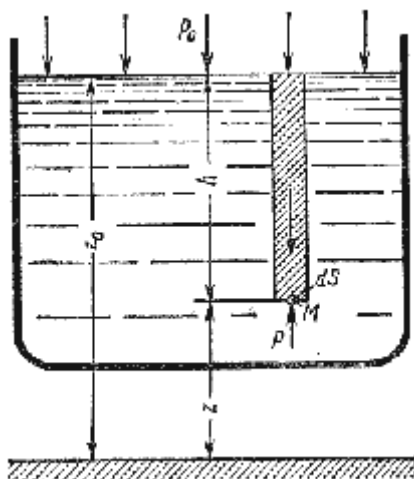


Рис. 2.2. Схема для вывода основного уравнения гидростатики

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

$$PdS - P_0 dS - \rho gh dS = 0$$

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

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

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 (подробно рассмотрим в п.2.6). 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 γ . Ширина стенки в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа (от читателя), равна b (рис.2.3). Стенка условно показана развернутой относительно оси AB и заштрихована на рисунке. Построим график изменения избыточного гидростатического давления на стенку AB .

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 A и B .

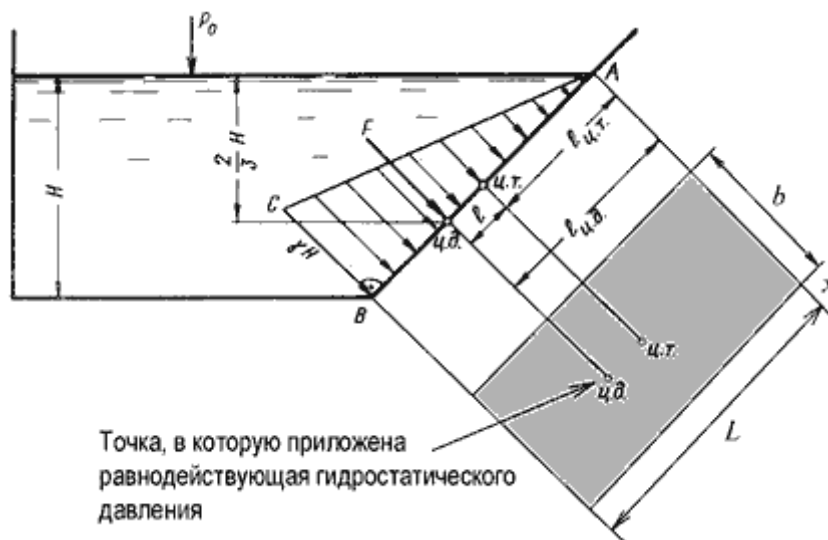


Рис. 2.3. Схема к определению равнодействующей гидростатического давления на плоскую поверхность

Избыточное гидростатическое давление в точке A будет равно

$$P_A = \gamma h = \gamma \cdot 0 = 0$$

Соответственно давление в точке B :

$$P_B = \gamma h = \gamma H$$

где H - глубина жидкости в резервуаре.

Согласно первому свойству гидростатического давления, оно всегда направлено по нормали к ограждающей поверхности. Следовательно, гидростатическое давление в точке B , величина которого равна γH , надо направлять перпендикулярно к стенке AB . Соединив точку A с концом отрезка γH , получим треугольную эпюру распределения давления ABC с прямым углом в точке B . Среднее значение давления будет равно

$$\frac{\gamma H + 0}{2} = \frac{\gamma H}{2}$$

Если площадь наклонной стенки $S=bL$, то равнодействующая гидростатического давления равна

$$F = \frac{\gamma H}{2} S = \gamma S h_c$$

где $hc = H/2$ - глубина погружения центра тяжести плоской поверхности под уровень жидкости.

Однако точка приложения равнодействующей гидростатического давления ц.д. не всегда будет совпадать с центром тяжести плоской поверхности. Эта точка находится на расстоянии l от центра тяжести и равна отношению момента инерции площадки относительно центральной оси к статическому моменту этой же площадки.

$$l = \frac{J_{Ax}}{\ell_{ц.т.} S},$$

где J_{Ax} - момент инерции площади S относительно центральной оси, параллельной Ax .

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 ABC (рис.2.4), простирающуюся в направлении читателя на ширину b . Восстановим из точки A перпендикуляр AO к свободной поверхности жидкости. Объем жидкости в отсеке $AOCB$ находится в равновесии. Это значит, что силы, действующие на поверхности выделенного объема V , и силы веса взаимно уравновешиваются.

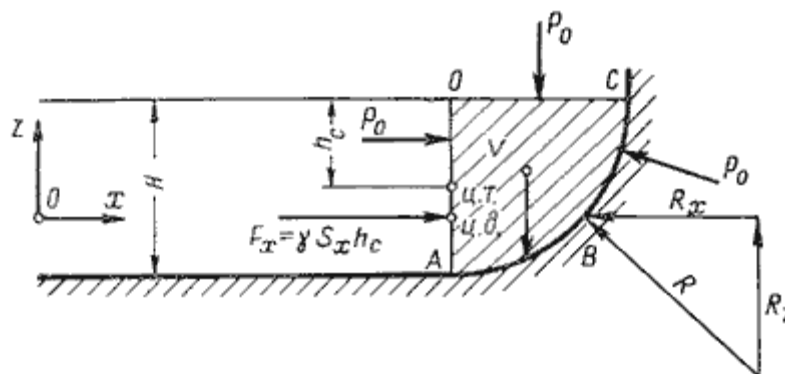


Рис. 2.4. Схема к определению равнодействующей гидростатического давления на цилиндрическую поверхность

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.

Спроецируем все силы на ось Ox :

$$F_x - R_x = 0 \text{ откуда } F_x = R_x = \gamma S_x h_c$$

Теперь спроецируем все силы на ось Oz :

$$R_x - G = 0 \text{ откуда } R_x = G = \gamma V$$

Составляющая силы гидростатического давления по оси Oy обращается в нуль, значит $R_y = F_y = 0$.

Таким образом, реакция цилиндрической поверхности в общем случае равна

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_z^2 + R_y^2}$$

а поскольку реакция цилиндрической поверхности равна равнодействующей гидростатического давления $R=F$, то делаем вывод, что

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2 + F_y^2}$$

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.

$$P_{\text{выт}} = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{погр}}$$

Для однородного тела плавающего на поверхности справедливо соотношение

$$\frac{V_{\text{погр}}}{V} = \frac{\rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{ж}}}$$

где: V - объем плавающего тела;
 $\rho_{\text{т}}$ - плотность 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 C 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 α , 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 дей-

ствия продолжим до пересечения с осью симметрии $O'-O''$. Полученная точка m называется *метацентром*, а отрезок $mC = h$ называется *метацентрической высотой*. Будем считать h положительным, если точка m лежит выше точки C , и отрицательным - в противном случае.

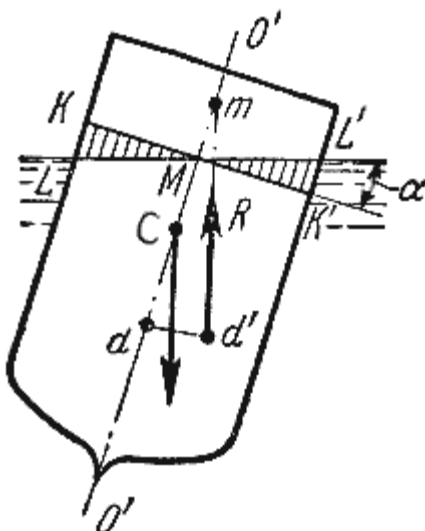


Рис. 2.5. Поперечный профиль судна

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 метацентрическая 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).

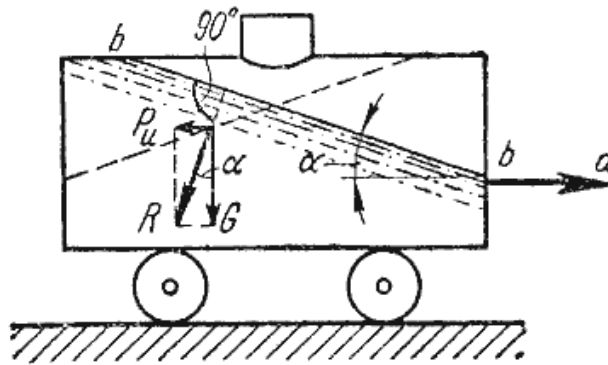


Рис. 2.6. Движение цистерны с ускорением

К каждой частице жидкости массы m должны в этом случае приложены ее вес $G = mg$ и сила инерции P_u , равная по величине ma . Равнодействующая $R = \sqrt{(mg)^2 + (ma)^2}$ этих сил направлена к вертикали под углом α , тангенс которого равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{g}$$

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 α с горизонтом. 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 α . 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 ω - угловая скорость вращения сосуда.

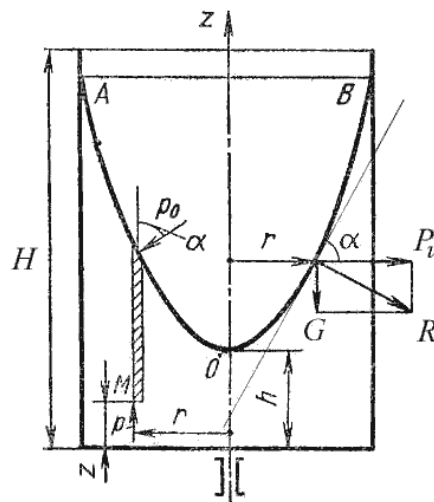


Рис. 2.7. Вращение сосуда с жидкостью

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:

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

где z - координата рассматриваемой точки. Таким образом, получаем:

$$\frac{\omega^2 r}{g} = \frac{dz}{dr}$$

откуда

$$dz = \frac{\omega^2}{g} r dr$$

или после интегрирования

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

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

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

т.е. кривая AOB 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 M) на произвольном радиусе r и высоте z и запишем условие его равновесия в вертикальном направлении. С учетом уравнения (2.11) будем иметь

$$PdS - \underbrace{\left[h - z + \frac{\omega^2 r^2}{2g} \right]}_{\text{высота цилиндра}} \rho g dS - P_0 \left(\frac{dS}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0$$

После сокращений получим

$$P = P_0 + \left[h - z + \frac{\omega^2 r^2}{2g} \right] \rho g$$

Это значит, что давление возрастает пропорционально радиусу r и уменьшается пропорционально высоте z .

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 ω (м^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).

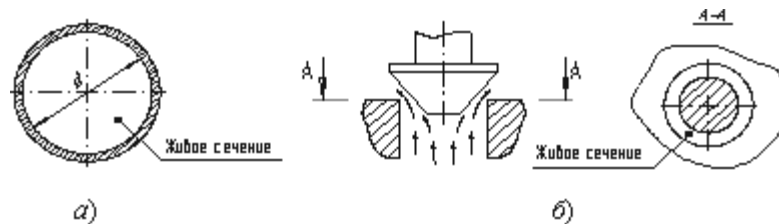


Рис. 3.1. Живые сечения: а - трубы, б - клапана

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

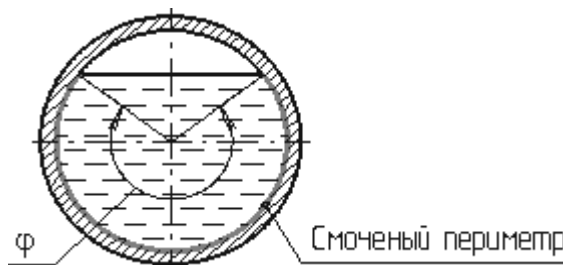


Рис. 3.2. Смоченный периметр

Для круглой трубы

$$\chi = \pi D \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{D\varphi}{2}$$

если угол в радианах, или

$$\chi = \pi D \frac{\varphi}{360^\circ}, \text{ если угол } \varphi \text{ в градусах.}$$

Расход потока Q - объем жидкости V , протекающей за единицу времени t через живое сечение ω .

$$Q = \frac{V}{t}, \text{ (м}^3\text{/с, литр/мин).}$$

Средняя скорость потока v - скорость движения жидкости, определяющаяся отношением расхода жидкости Q к площади живого сечения ω

$$v_{cp} = \frac{Q}{\omega}, \text{ (м/с)}$$

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. *Установившимся* движением называется такое движение жидкости, при котором в данной точке русла давление и скорость не изменяются во времени

$$v = f(x, y, z)$$

$$P = \varphi f(x, y, z)$$

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

$$v = f_1(x, y, z, t)$$

$$P = \varphi f_1(x, y, z, t)$$

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*.

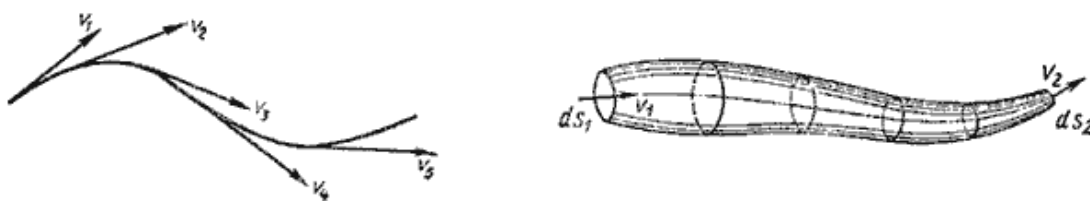


Рис. 3.3. Линия тока и струйка

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.

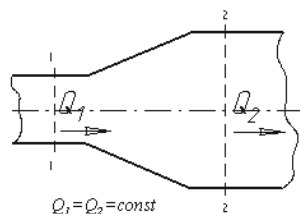


Рис. 3.4. Труба с переменным диаметром при постоянном расходе

Из закона сохранения вещества и постоянства расхода вытекает *уравнение неразрывности* течений. Представим трубу с переменным живым сечением (рис.3.4). Расход жидкости через трубу в любом ее сечении постоянен, т.е. $Q_1=Q_2=const$, откуда

$$\omega_1 v_1 = \omega_2 v_2$$

Таким образом, если течение в трубе является сплошным и неразрывным, то уравнение неразрывности примет вид:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = const$$

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 β (рис.3.5).

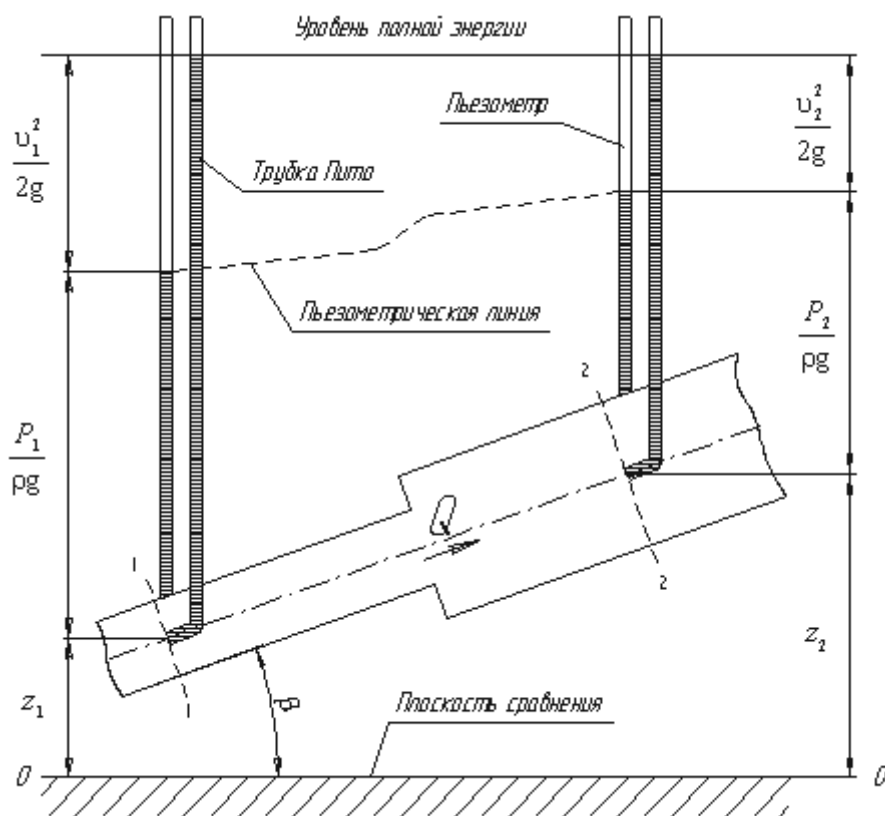


Рис.3.5. Схема к выводу уравнения Бернулли для идеальной жидкости

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 *пъезометры* - тонкостенные стеклянные трубки, в которых жидкость поднимается на высоту $\frac{P}{\rho g}$. 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 *трубка 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 $O-O$, 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.

С энергетической точки зрения каждый член уравнения представляет собой определенные виды энергии:

z_1 и z_2 - удельные энергии положения, характеризующие потенциальную энергию в сечениях 1-1 и 2-2;

$\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - удельные энергии давления, характеризующие потенциальную энергию давления в тех же сечениях;

$\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ - удельные кинетические энергии в тех же сечениях.

Следовательно, согласно уравнению Бернулли, *полная удельная энергия идеальной жидкости в любом сечении постоянна*.

Уравнение Бернулли можно истолковать и чисто геометрически. Дело в том, что каждый член уравнения имеет линейную размерность. Глядя на рис.3.5, можно заметить, что z_1 и z_2 - геометрические высоты сечений 1-1 и 2-2 над плоскостью сравнения; $\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - пьезометрические высоты; $\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ - скоростные высоты в указанных сечениях.

В этом случае уравнение Бернулли можно прочитать так: *сумма геометрической, пьезометрической и скоростной высоты для 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).

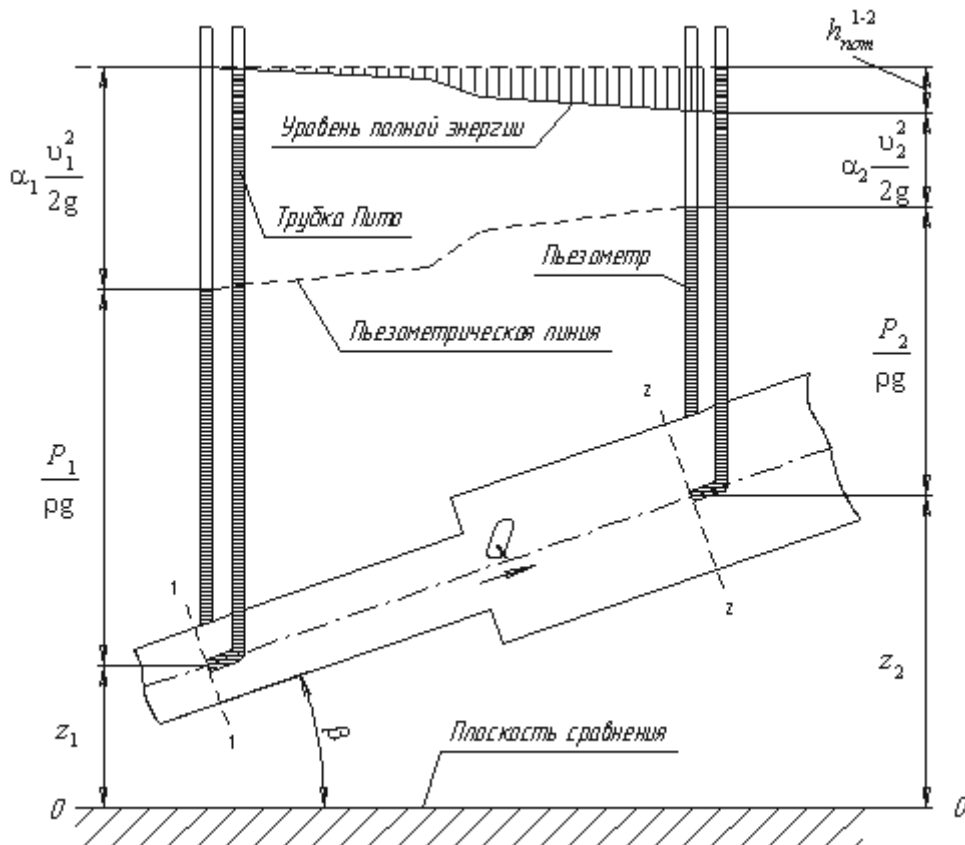


Рис.3.6. Схема к выводу уравнения Бернулли для реальной жидкости

Потерянная энергия или потерянный напор обозначаются $h_{пот}^{1-2}$ и имеют также линейную размерность.

Уравнение Бернулли для реальной жидкости будет иметь вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{пот}^{1-2} = H = \text{const}$$

Из рис.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.

Кроме этого в уравнении появились еще два коэффициента α_1 и α_2 , которые называются *коэффициентами Кориолиса* и зависят от режима течения жидкости ($\alpha = 2$ для ламинарного режима, $\alpha = 1$ для турбулентного режима).

Потерянная высота $h_{пот}^{1-2}$ складывается из линейных потерь, вызванных силой трения между слоями жидкости, и потерь, вызванных местными сопротивлениями (изменениями конфигурации потока)

$$h_{пот}^{1-2} = h_{лин} + h_{мест}$$

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 , ρ , 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

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

где H - столб жидкости в трубке Пито.

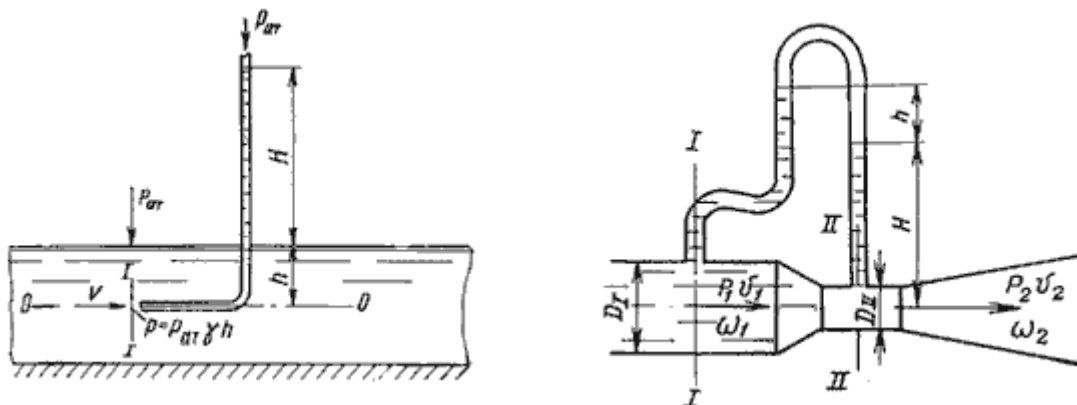


Рис. 3.7. Трубка Пито и расходомер Вентури

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.

Пренебрегая потерями напора и считая $z_1 = z_2$, напишем уравнение Бернулли для сечений *I-I* и *II-II*:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

или

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{v_1^2}{2g} \left[-1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right]$$

Используя уравнение неразрывности

$$Q = v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$$

сделаем замену в полученном выражении:

$$h = \frac{Q^2}{2g\omega_1^2} \left[-1 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right]$$

Решая относительно Q , получим

$$Q = \omega_1 \omega_2 \sqrt{\frac{2g}{\omega_1^2 - \omega_2^2}} \cdot \sqrt{h}$$

Выражение, стоящее перед \sqrt{h} , является постоянной величиной, носящей название постоянной водомера Вентури.

Из полученного уравнения видно, что h зависит от расхода Q . Часто эту зависимость строят в виде тарировочной кривой h от Q , которая имеет параболический характер.

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 бесстемно. 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.

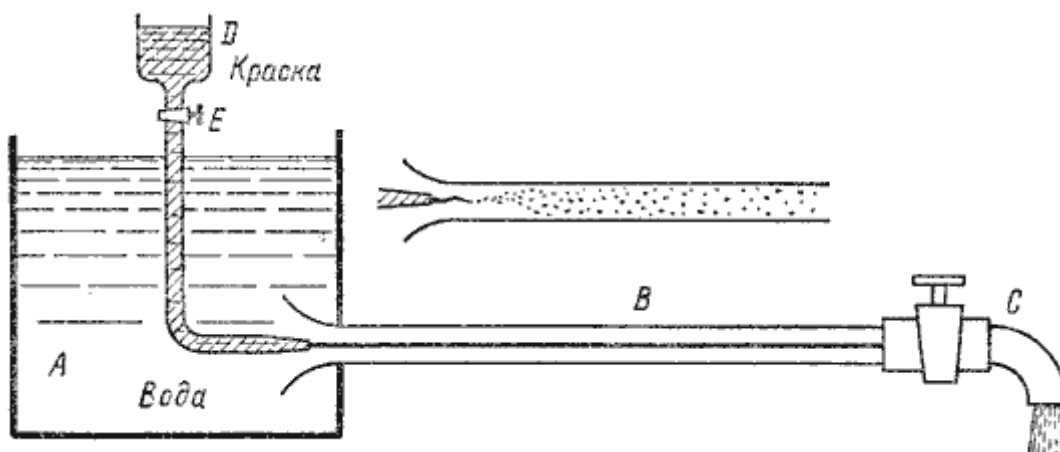


Рис. 4.1. Схема установки Рейнольдса

Установка состоит из резервуара А с водой, от которого отходит стеклянная труба В с краном С на конце, и сосуда D 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 E 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 перемешивания. Если при этом, если к трубе подсоединить пьезометр или трубку Пито, то они покажут неизменность давления и скорости по времени. Такой режим движения называется *ламинарный*.

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.

$$v_{кр} = \frac{\nu}{d} \cdot k$$

где ν - кинематическая вязкость;
 k - безразмерный коэффициент;
 d - внутренний диаметр 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.

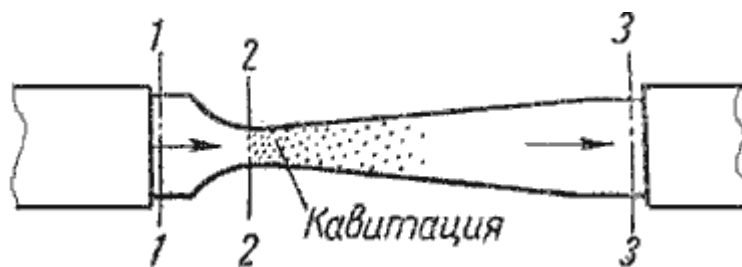


Рис. 4.2. Схема трубки для демонстрации кавитации

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 поперечно-*

му сечению потока представляет собой параболоид вращения, а сечение параболоида осевой плоскостью - квадратичную параболу (рис.4.3).

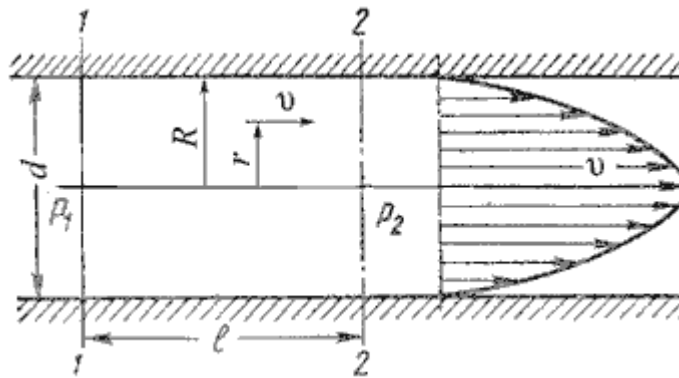


Рис. 4.3. Схема для рассмотрения ламинарного потока

Уравнение, связывающее переменные v и r , имеет следующий вид:

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} (R^2 - r^2)$$

где P_1 и P_2 - давления соответственно в сечениях 1 и 2.

У стенок трубы величина $r = R$, значит скорость $v = 0$, а при $r = 0$ (на оси потока) скорость будет максимальной

$$v_{\max} = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} (R^2 - 0^2) = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} R^2$$

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. Определим этот объем.

Максимальная скорость дает высоту параболоида

$$h = v_{\max} = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} R^2$$

Как известно из геометрии, объем параболоида высотой h и площадью ρR^2 равен

$$V = \pi R^2 \frac{h}{2},$$

а в нашем случае

$$Q = \frac{1}{2} \pi R^2 \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} R^2 = \frac{P_1 - P_2}{8\mu l} \pi R^4$$

Если вместо R подставить диаметр трубы d , то формула (4.4) приобретет вид

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{128\mu l} \pi d^4$$

Расход в трубе можно выразить через среднюю скорость:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{128\mu\ell} \pi d^4 = v_{cp} \frac{\pi d^2}{4}$$

откуда

$$v_{cp} = \frac{P_1 - P_2}{32\mu\ell} d^2$$

Для определения потерь напора при ламинарном течении жидкости в круглой трубе рассмотрим участок трубы длиной l , по которому поток течет в условиях ламинарного режима (рис.4.3).

Потеря давления в трубопроводе будет равна

$$P_1 - P_2 = \frac{32\mu\ell}{d^2} v_{cp}$$

Если в формуле динамический коэффициент вязкости μ заменить через кинематический коэффициент вязкости ν и плотность ρ ($\mu = \nu \rho$) и разделить обе части равенства на объемный вес жидкости $\gamma = \rho g$, то получим:

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = \frac{32\nu\rho\ell}{\rho g d^2} v_{cp}$$

Так как левая часть полученного равенства равна потерям напора $h_{ном}$ в трубе постоянного диаметра, то окончательно это равенство примет вид:

$$h_{ном} = \frac{32\nu\ell}{g d^2} v_{cp}$$

Уравнение может быть преобразовано в универсальную формулу Вейсбаха-Дарси, которая окончательно записывается так:

$$h_{ном} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

где λ - коэффициент гидравлического трения, который для ламинарного потока вычисляется по выражению:

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

Однако при ламинарном режиме для определения коэффициента гидравлического трения λ Т.М. Башта рекомендует при $Re < 2300$ применять формулу

$$\lambda = \frac{75}{Re}$$

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 $v_{оср}$, которое в данном случае остается постоянным.

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

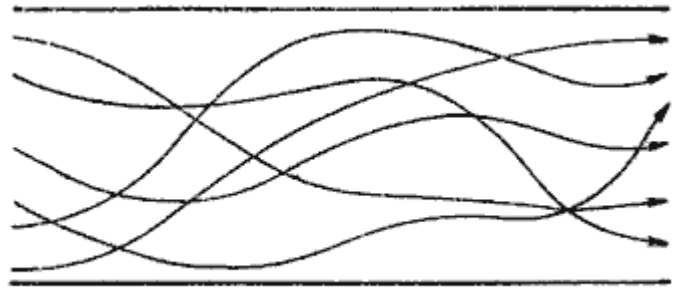
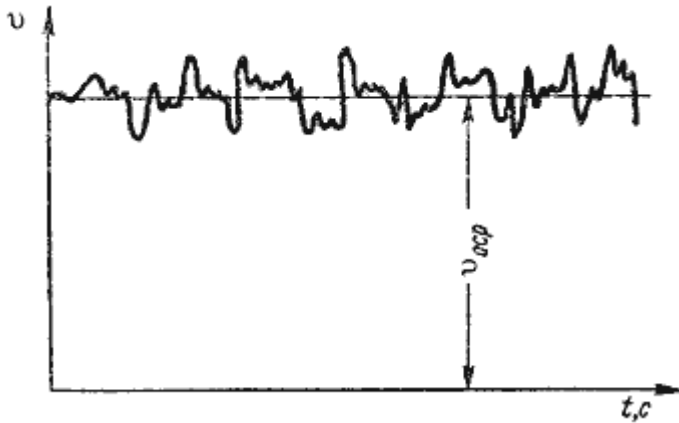


Рис. 4.4. Пульсация скорости в турбулентном потоке.

Рис. 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 δ 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 δ с ламинарным режимом весьма мал по сравнению с турбулентным ядром.

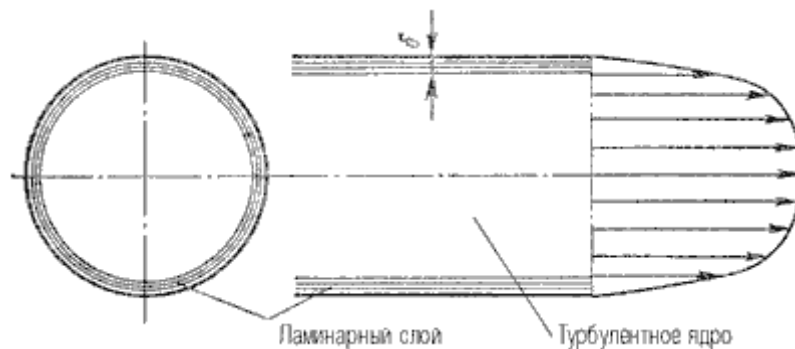


Рис. 4.6. Модель турбулентного режима движения жидкости

Основной расчетной формулой для потерь напора при турбулентном течении жидкости в круглых трубах является уже приводившаяся выше эмпирическая формула, называемая формулой Вейсбаха-Дарси и имеющая следующий вид:

$$h_{пот} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Различие заключается лишь в значениях коэффициента гидравлического трения λ . Этот коэффициент зависит от числа Рейнольдса Re и от безразмерного геометрического фактора - относительной шероховатости Δ/d (или Δ/r_0 , где r_0 - радиус трубы).

Впервые наиболее исчерпывающей работы по определению были даны И.И. Никурадзе, который на основе опытных данных построил график зависимости $lg(1000\lambda)$ от $lg Re$ для ряда значений Δ/r_0 . Опыты Никурадзе были проведены на трубах с искусственно заданной шероховатостью, полученной путем приклейки песчинок определенного размера на внутренние стенки трубопровода. Результаты этих исследований представлены на рис. 4.7, где построены кривые зависимости $lg(1000\lambda)$ от $lg Re$ для ряда значений Δ/r_0 .

Прямая *I* соответствует ламинарному режиму движения жидкости.

Далее на графике можно рассматривать три области.

Первая область - область малых Re и Δ/r_0 , где коэффициент λ не зависит от шероховатости, а определяется лишь числом Re (отмечена на рис.4.7 прямой *II*). Это область гидравлически гладких труб. Если число Рейнольдса лежит в диапазоне $4000 < Re < 10(d / \Delta_э)$ коэффициент λ определяется по полуэмпирической формуле Блазиуса

$$\lambda_r = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

Для определения существует также эмпирическая формула П.К. Копакова, которая применима для гидравлически гладких труб

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

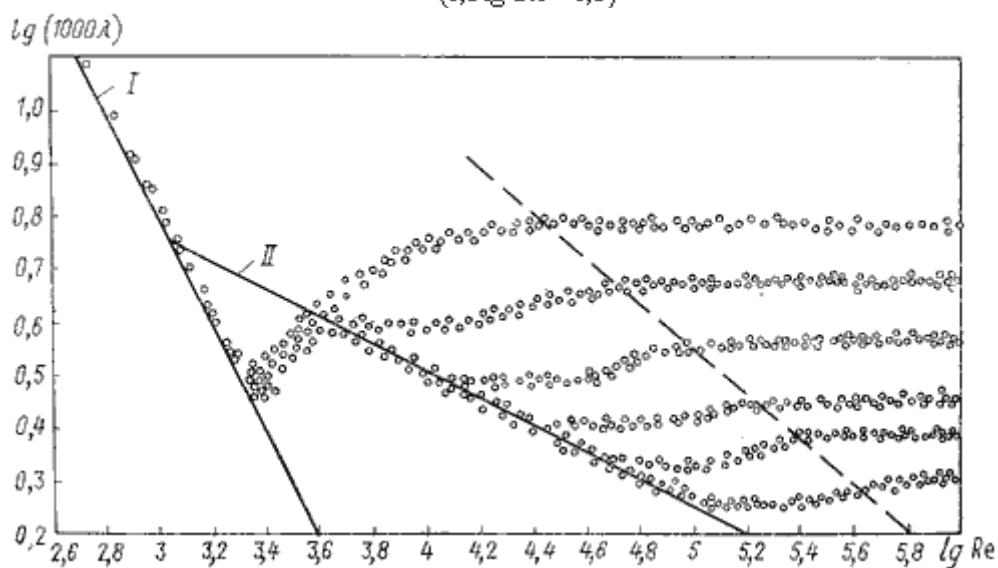


Рис. 4.7. График Никурадзе

Во второй области, расположенной между линией *II* и пунктирной линией справа, коэффициент λ зависит одновременно от двух параметров - числа Re и относительной шероховатости Δ/r_0 , которую можно заменить на $\Delta_э$. Для определения коэффициента λ в этой области может служить универсальная формула А.Д. Альтшуля:

$$\lambda_r = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$$

где $\Delta_э$ - эквивалентная абсолютная шероховатость.

Характерные значения Δ_3 (в мм) для труб из различных материалов приведены ниже:

Стекло	0
Трубы, тянутые из латуни, свинца, меди	0...0,002
Высококачественные бесшовные стальные трубы	0,06...0,2
Стальные трубы	0,1...0,5
Чугунные асфальтированные трубы	0,1...0,2
Чугунные трубы	0,2...1,0

Третья область - область больших Re и Δ/d_0 , где коэффициент λ не зависит от числа Re , а определяется лишь относительной шероховатостью (область расположена справа от пунктирной линии). Это *область шероховатых труб*, в которой все линии с различными шероховатостями параллельны между собой. Эту область называют областью автомодельности или режимом квадратичного сопротивления, т.к. здесь гидравлические потери пропорциональны квадрату скорости.

Определение λ для этой области производят по упрощенной формуле Альтшуля:

$$\lambda_r = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}$$

или по формуле Прандтля - Никурадзе:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_r}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_3}{3,71d} \right)$$

Итак, потери напора, определяемые по формуле Вейсбаха-Дарси, можно определить, зная коэффициент гидравлического сопротивления, который определяется в зависимости от числа Рейнольдса Re и от эквивалентной абсолютной шероховатости Δ_3 . Для удобства сводные данные по определению λ представлены в таблице 4.1.

Пользоваться приведенными в табл. 4.1 формулами для определения коэффициента λ не всегда удобно. Для облегчения расчетов можно воспользоваться номограммой Колбрука-Уайта (рис.4.8), при помощи которой по известным Re и Δ_3/d весьма просто определяется λ .

Таблица 4.1

Таблица для определения коэффициента гидравлического трения

Режим движения	Число Рейнольдса	Определение λ
Ламинарный	$Re < 2300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$ или $\lambda = \frac{75}{Re}$
Переходный	$2300 < Re < 4000$	<i>Проектирование трубопроводов не рекомендуется</i>
Турбулентный	1-я область $4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_3}$	$\lambda_r = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ (ф-ла Блазиуса) $\lambda_r = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}$ (ф-ла Конакова)
	2-я область $10 \frac{d}{\Delta_3} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_3}$	$\lambda_r = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля)
	3-я область $Re > 560 \frac{d}{\Delta_3}$	$\lambda_r = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля) $\frac{1}{\sqrt{\lambda_r}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_3}{3,71d} \right)$ (ф-ла Никурадзе)

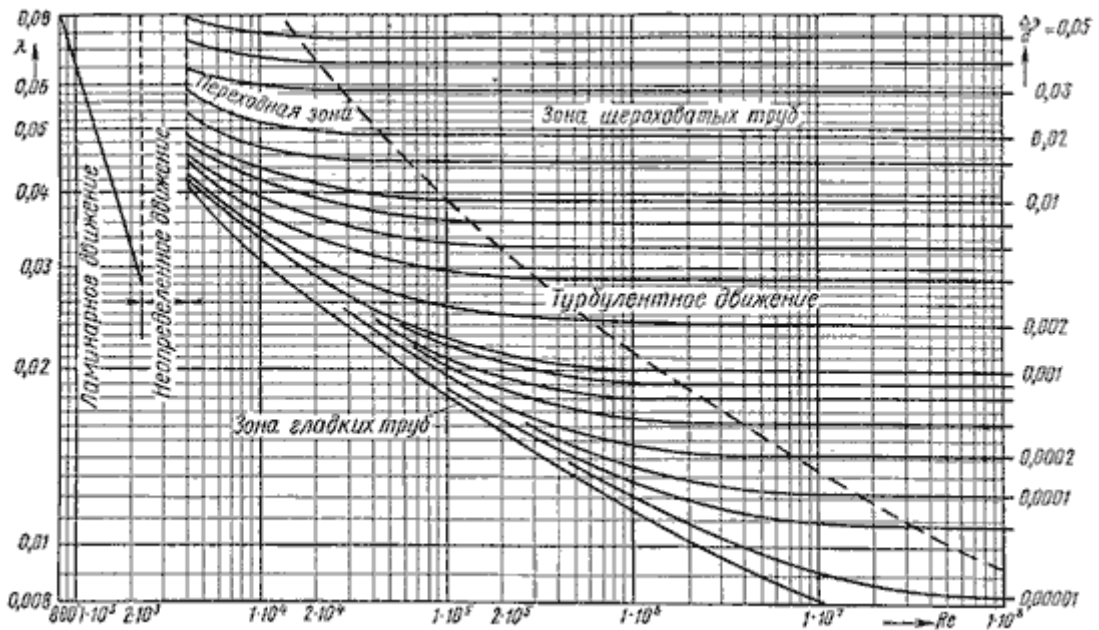


Рис. 4.8. Номограмма Колбрука-Уайта для определения коэффициента гидравлического трения

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.

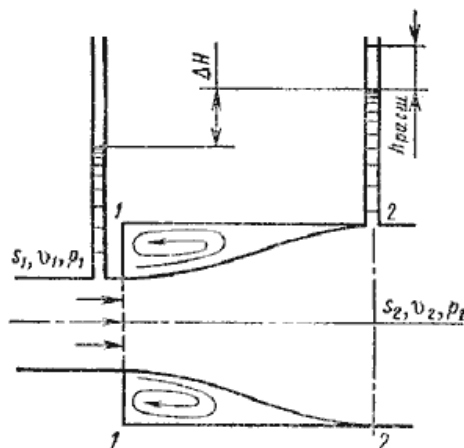


Рис. 4.9. Внезапное расширение трубы

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 ΔH большую, чем первый; но если бы потерь напора в данном месте не было, то второй пьезометр показал бы высоту большую еще на $h_{расш}$. Эта высота и есть местная потеря напора на расширение, которая определяется по формуле:

$$h_{расш} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

где S_1, S_2 - площадь поперечных сечений 1-1 и 2-2.

Это выражение является следствием *теоремы Борда*, которая гласит, что потеря напора при внезапном расширении русла равна скоростному напору, определенному по разности скоростей

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

Выражение $(1 - S_1/S_2)^2$ обозначается греческой буквой ζ (дзета) и называется коэффициентом потерь, таким образом

$$h_{расш} = \zeta \frac{v_1^2}{2g}$$

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 α .

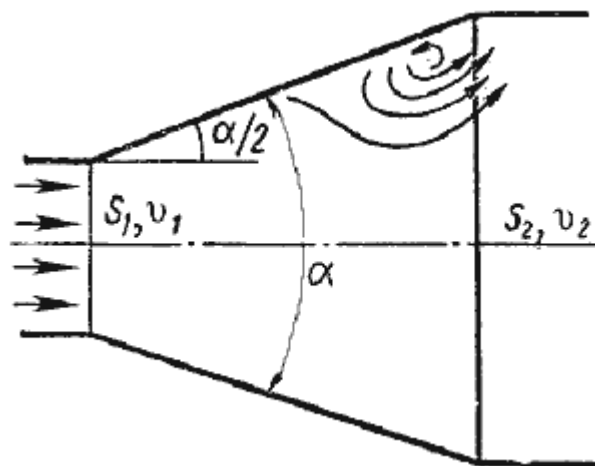


Рис. 4.10. Постепенное расширение трубы

Кроме того, в диффузоре имеются и обычные потери на трение, подобные тем, которые возникают в трубах постоянного сечения. Полную потерю напора в диффузоре рассматривают как сумму двух слагаемых:

$$h_{диф} = h_{тр} + h_{расш}$$

где $h_{тр}$ и $h_{расш}$ - потери напора на трение и расширение (вихреобразование).

$$h_{тр} = \frac{\lambda_r}{8 \cdot \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_1^2}{2g}$$

где $n = S_2/S_1 = (r_2/r_1)^2$ - степень расширения диффузора. Потеря напора на расширение $h_{расш}$ имеет ту же самую природу, что и при внезапном расширении русла

$$h_{расш} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 k \frac{v_1^2}{2g}$$

где k - коэффициент смягчения, при $\alpha = 5 \dots 20^\circ$, $k = \sin \alpha$.

Учитывая это полную потерю напора можно переписать в виде:

$$h_{диф} = \left[\frac{\lambda_r}{8 \cdot \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + k \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \right] \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_{диф} \frac{v_1^2}{2g}$$

откуда коэффициент сопротивления диффузора можно выразить формулой

$$\zeta_{диф} = \frac{\lambda_r}{8 \cdot \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + \sin \alpha \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2$$

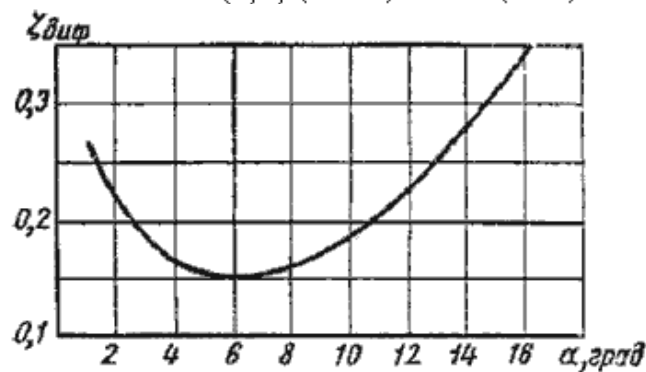


Рис. 4.11. Зависимость $\zeta_{диф}$ от угла

Функция $\zeta = f(\alpha)$ имеет минимум при некотором наиболее выгодном оптимальном значении угла α , оптимальное значение которого определится следующим выражением:

$$\alpha_{опт} = \arcsin \sqrt{\frac{n+1}{n-1} \cdot \frac{\lambda_r}{4}}$$

При подстановке в эту формулу $\lambda_r = 0,015 \dots 0,025$ и $n = 2 \dots 4$ получим $\alpha_{опт} = 6$ (рис.4.11).

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 суженной части потока (рис.4.12).

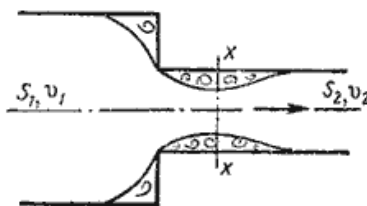
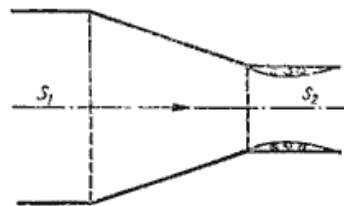


Рис. 4.12. Внезапное сужение трубы



4.13. Конфузор

Полная потеря напора определится по формуле ;

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

где коэффициент сопротивления сужения определяется по полуэмпирической формуле И.Е. Идельчика:

$$\zeta_{суж} = 0,5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right) = 0,5 \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

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

При выходе трубы из резервуара больших размеров, когда можно считать, что $S_2/S_1 = 0$, а также при отсутствии закругления входного угла, коэффициент сопротивления $\zeta_{суж} = 0,5$.

4. *Постепенное сужение русла.* Данное местное сопротивление представляет собой коническую сходящуюся трубу, которая называется *конфузором* (рис.4.13). Течение жидкости в конфузоре сопровождается увеличением скорости и падением давления. В конфузоре имеются лишь потери на трение

$$h_{конф} = \frac{\lambda_T}{8 \cdot \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{v_2^2}{2g}$$

где коэффициент сопротивления конфузора определяется по формуле

$$\zeta_{конф} = \frac{\lambda_T}{8 \cdot \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

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

Небольшое вихреобразование и отрыв потока от стенки с одновременным сжатием потока возникает лишь на выходе из конфузора в месте соединения конической трубы с цилиндрической. Закруглением входного угла можно значительно уменьшить потерю напора при входе в трубу. Конфузор с плавно сопряженными цилиндрическими и коническими частями называется *соплом* (рис.4.14).

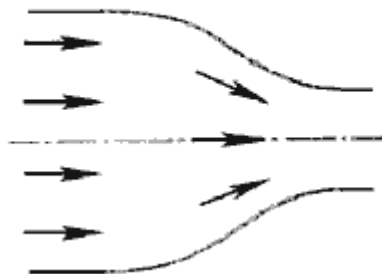


Рис. 4.14. Сопло

5. *Внезапный поворот трубы (колени).* Данный вид местного сопротивления (рис.4.15) вызывает значительные потери энергии, т.к. в нем происходят отрыв потока и вихреобразования, причем потери тем больше, чем больше угол δ . Потерю напора рассчитывают по формуле

$$h_{\text{кол}} = \zeta_{\text{кол}} \frac{v^2}{2g}$$

где $\zeta_{\text{кол}}$ - коэффициент сопротивления колена круглого сечения, который определяется по графику в зависимости от угла колена δ (рис.4.16).

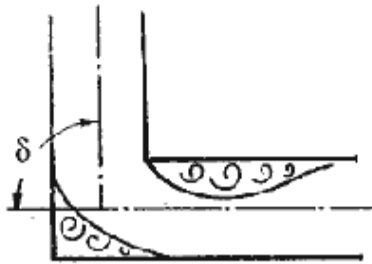


Рис. 4.15.

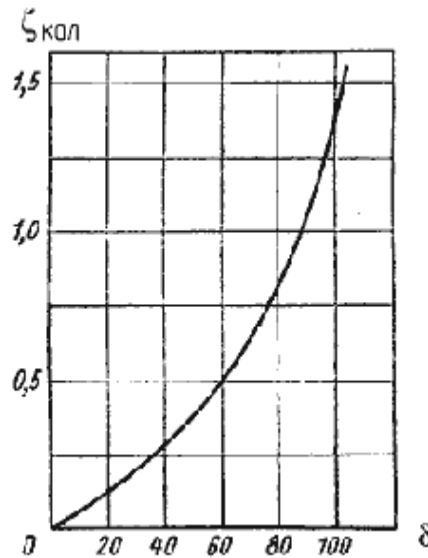


Рис. 4.16. Зависимости $\zeta_{\text{кол}}$ от угла δ

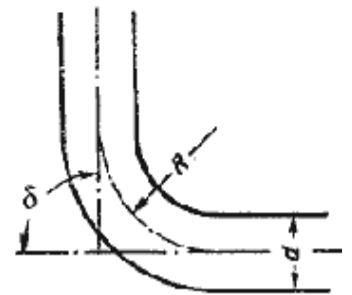


Рис. 4.17. Отвод

6. *Постепенный поворот трубы (закругленное колено или отвод)*. Плавность поворота значительно уменьшает интенсивность вихреобразования, а следовательно, и сопротивление отвода по сравнению с коленом. Это уменьшение тем больше, чем больше относительный радиус кривизны отвода R/d (рис.4.17). Коэффициент сопротивления отвода $\zeta_{\text{отв}}$ зависит от отношения R/d , угла δ , а также формы поперечного сечения трубы.

Для отводов круглого сечения с углом $\delta = 90^\circ$ и $R/d \geq 1$ при турбулентном течении можно воспользоваться эмпирической формулой:

$$\zeta'_{\text{отв}} = 0,051 + \frac{0,19d}{R}$$

Для углов $\delta \leq 70^\circ$ коэффициент сопротивления

$$\zeta_{\text{отв}} = 0,9 \zeta'_{\text{отв}} \sin \delta$$

а при $\delta \geq 100^\circ$

$$\zeta_{\text{отв}} = \left(0,7 + \frac{\delta}{90} 0,35 \right) \zeta'_{\text{отв}}$$

Потеря напора в колене определится как

$$h_{\text{отв}} = \zeta_{\text{отв}} \frac{v^2}{2g}$$

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. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ, НАСАДКОВ И ИЗ-ПОД ЗАТВОРОВ

Рассмотрим различные случаи истечения жидкости из резервуаров, баков, котлов через отверстия и насадки (коротки трубки различной формы) в атмосферу или пространство, заполненное газом или той же жидкостью. В процессе такого истечения запас потенциальной энергии, которым обладает жидкость, находящаяся в резервуаре, превращается в кинетическую энергию свободной струи.

Основным вопросом, который интересует в данном случае, является определение скорости истечения и расхода жидкости для различных форм отверстий и насадков.

5.1. Истечение через малые отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре

Рассмотрим большой резервуар с жидкостью под давлением P_0 , имеющий малое круглое отверстие в стенке на достаточно большой глубине H_0 от свободной поверхности (рис.5.1).

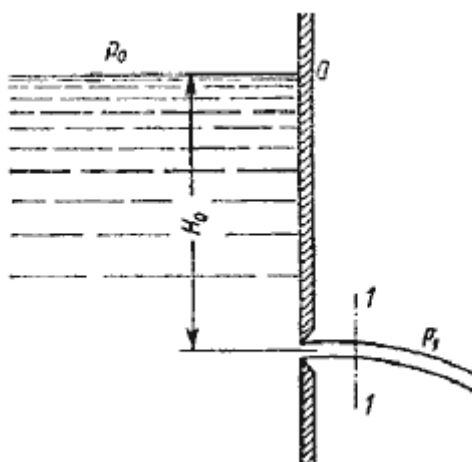


Рис. 5.1. Истечение из резервуара через малое отверстие

Жидкость вытекает в воздушное пространство с давлением P_1 . Пусть отверстие имеет форму, показанную на рис.5.2, а, т.е. выполнено в виде сверления в тонкой стенке без обработки входной кромки или имеет форму, показанную на рис.5.2, б, т.е. выполнено в толстой стенке, но с заострением входной кромки с внешней стороны. Струя, отрываясь от кромки отверстия, несколько сжимается (рис.5.2, а). Такое сжатие обусловлено движением жидкости от различных направлений, в том числе и от радиального движения по стенке, к осевому движению в струе.

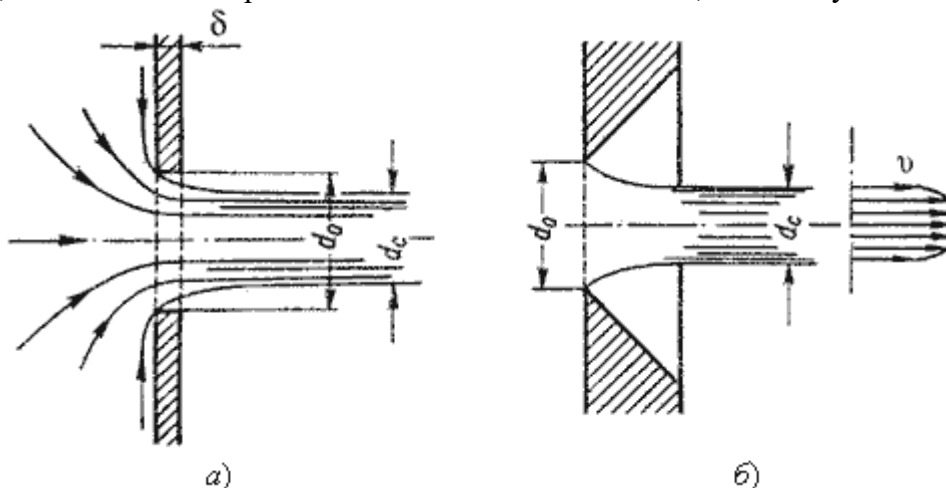


Рис. 5.2. Истечение через круглое отверстие

Степень сжатия оценивается коэффициентом сжатия.

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_o} = \left(\frac{d_c}{d_o} \right)^2$$

где S_c и S_o - площади поперечного сечения струи и отверстия соответственно; d_c и d_o - диаметры струи и отверстия соответственно.

Скорость истечения жидкости через отверстие такое отверстие

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

где H - напор жидкости, определяется как

$$H = H_0 + \frac{P_0 - P_1}{\rho g}$$

φ - коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}$$

где α - коэффициент Кориолиса; ζ - коэффициент сопротивления отверстия.

Расход жидкости определяется как произведение действительной скорости истечения на фактическую площадь сечения:

$$Q = S_c v = \underbrace{\varepsilon S_o}_{S_c} \underbrace{\varphi \sqrt{2gH}}_v$$

Произведение ε и φ принято обозначать буквой и называть коэффициентом расхода, т.е. $\mu = \varepsilon\varphi$.

В итоге получаем расход

$$Q = \mu S_o \sqrt{2gH} = \mu S_o \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}}$$

где ΔP - расчетная разность давлений, под действием которой происходит истечение.

При помощи этого выражения решается основная задача - определяется расход.

Значение коэффициента сжатия ε , сопротивления ζ , скорости φ и расхода μ для круглого отверстия можно определить по эмпирически построенным зависимостям. На рис.5.3 показаны зависимости коэффициентов ε , ζ и μ от числа Рейнольдса, подсчитанного для идеальной скорости

$$Re_u = \frac{d \sqrt{2gH}}{\nu}$$

где ν - кинематическая вязкость.

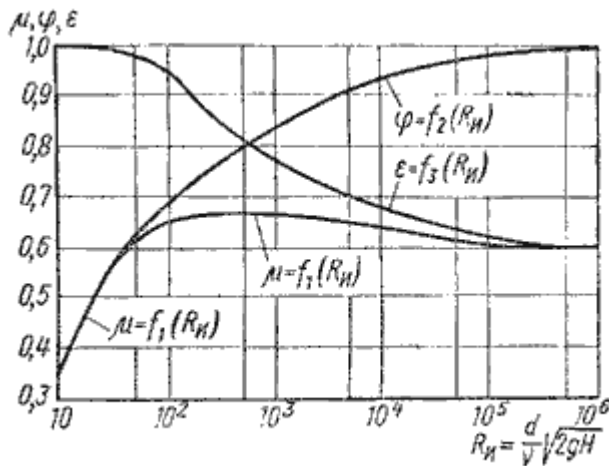


Рис. 5.3. Зависимость ϵ , ϕ и μ от числа Re_n

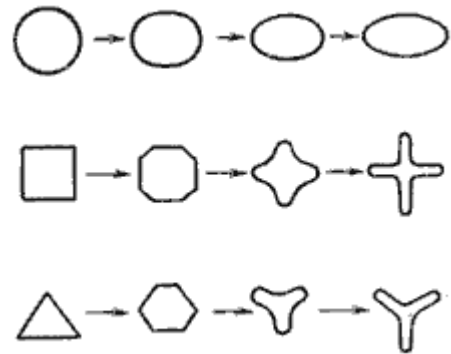


Рис. 5.4. Инверсия струй

При истечении струи в атмосферу из малого отверстия в тонкой стенке происходит изменение формы струи по ее длине, называемое *инверсией струи* (рис.5.4). Обуславливается это явление в основном действием сил поверхностного натяжения на вытекающие криволинейные струйки и различными условиями сжатия по периметру отверстия. Инверсия больше всего проявляется при истечении из некруглых отверстий.

5.2. Истечение при несовершенном сжатии

Несовершенное сжатие наблюдается в том случае, когда на истечение жидкости через отверстие и на формирование струи оказывает влияние близость боковых стенок резервуара (рис.5.5).

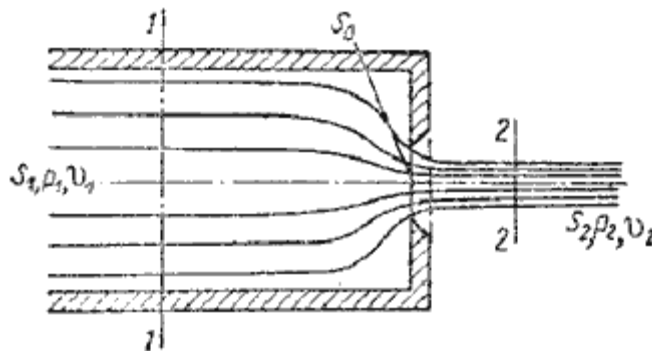


Рис. 5.5. Схема несовершенного сжатия струи

Так как боковые стенки частично направляют движение жидкости при подходе к отверстию, то струя по выходе из отверстия сжимается в меньшей степени, чем из резервуара неограниченных размеров, как это было описано в п.5.1.

При истечении жидкостей из цилиндрического резервуара круглого сечения через круглое отверстие, расположенное в центре торцевой стенки, при больших числах Re коэффициент сжатия для идеальной жидкости можно найти по формуле, представленной Н.Е. Жуковским:

$$\epsilon_1 = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}$$

где n - отношение площади отверстия S_o к площади поперечного сечения резервуара S_1

$$n = \frac{S_o}{S_1}$$

Расход жидкости при несовершенном сжатии

$$Q = \mu_1 S_o \sqrt{2gH}$$

где напор H нужно находить с учетом скоростного напора в резервуаре

$$H = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

5.3. Истечение под уровень

Часто приходится иметь дело с истечением жидкости не в атмосферу, а в пространство, заполненное этой же жидкостью (рис.5.6). такой случай называется *истечением под уровень*, или истечением через затопленное отверстие.

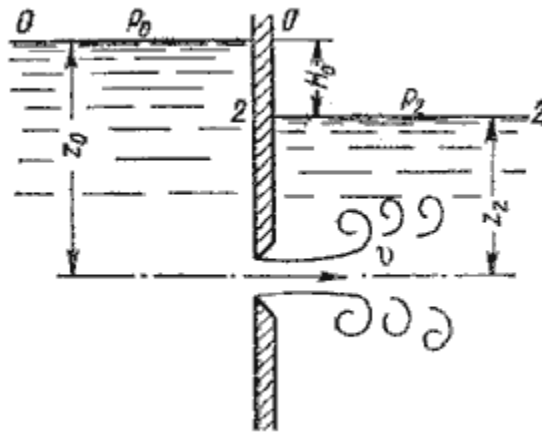


Рис. 5.6. Истечение по уровень

В этом случае вся кинетическая энергия струи теряется на вихреобразование, как при внезапном расширении.

Скорость истечения в сжатом сечении струи

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

где φ - коэффициент скорости;
 H - расчетный напор,

$$H = H_0 + \frac{P_0 - P_2}{\rho g}$$

Расход жидкости равен

$$Q = S_c v = \underbrace{\varepsilon S_o}_{S_c} \underbrace{\varphi \sqrt{2gH}}_v = \mu S_o \sqrt{2gH}$$

Таким образом, имеем те же расчетные формулы, что и при истечении в воздух (газ), только расчетный напор H в данном случае представляет собой разность гидростатических напоров по обе стенки, т.е. скорость и расход жидкости в данном случае не зависят от высот расположения отверстия.

Коэффициенты сжатия и расхода при истечении под уровень можно принимать те же, что и при истечении в воздушную среду.

5.4. Истечение через насадку при постоянном напоре

Внешним цилиндрическим насадком называется короткая трубка длиной, равной нескольким диаметрам без закругления входной кромки (рис. 5.7). На практике такой насадок часто получается в тех случаях, когда выполняют сверление в толстой стенке и не обрабатывают входную кромку. Истечение через такой насадок в газовую среду может происходить в двух режимах.

Первый режим - *безотрывный режим*. При истечении струя, после входа в насадок сжимается примерно так же, как и при истечении через отверстие в тонкой стенке. Затем струя постепенно расширяется до размеров отверстия из насадка выходит полным сечением (рис.5.7).

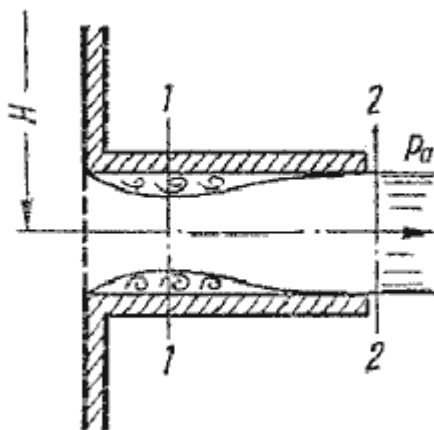


Рис. 5.7. Истечение через насадок

Коэффициент расхода μ , зависящий от относительной длины насадка l/d и числа Рейнольдса, определяется по эмпирической формуле:

$$\mu = \frac{1}{1,23 + \frac{58}{Re} \frac{l}{d}}$$

Так как на выходе из насадка диаметр струи равен диаметру отверстия, то коэффициент сжатия $\epsilon = 1$ и, следовательно, $\mu = \phi$, а коэффициент сопротивления $\zeta = 0,5$.

Если составить уравнение Бернулли для сжатого сечения 1-1 и сечения за насадком 2-2 и преобразовать его, то можно получить падение давления внутри насадка

$$P_2 - P_1 \approx 0,75H\rho g$$

При некотором критическом напоре $H_{кр}$ абсолютное давление внутри насадка (сечение 1-1) становится равным нулю ($P_1 = 0$), и поэтому

$$H_{кр} \approx \frac{P_2}{0,75\rho g}$$

Следовательно, при $H > H_{кр}$ давление P_1 должно было бы стать отрицательным, но так как в жидкостях отрицательных давлений не бывает, то первый режим движения становится невоз-

можным. Поэтому при $H \approx H_{кр}$ происходит изменение режима истечения, переход от первого режима ко второму (рис.5.8).

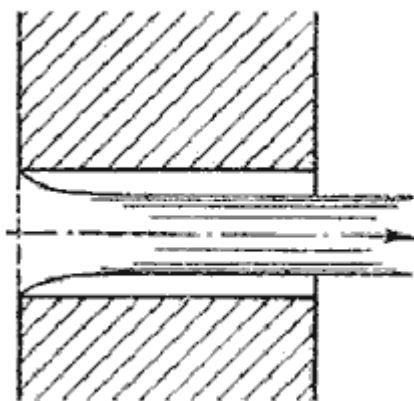


Рис. 5.8. Второй режим истечения через насадок

Второй режим характеризуется тем, что струя после сжатия уже не расширяется, а сохраняет цилиндрическую форму и перемещается внутри насадка, не соприкасаясь с его стенками. Истечение становится точно таким же, как и из отверстия в тонкой стенке, с теми же значениями коэффициентов. Следовательно, при переходе от первого режима ко второму скорость возрастает, а расход уменьшается благодаря сжатию струи.

При истечении через цилиндрический насадок под уровень первый режим истечения не будет отличаться от описанного выше. Но при $H > H_{кр}$ перехода ко второму режиму не происходит, а начинается кавитационный режим.

Таким образом, внешний цилиндрический насадок имеет существенные недостатки: на первом режиме - большое сопротивление и недостаточно высокий коэффициент расхода, а на втором - очень низкий коэффициент расхода. Недостатком также является возможность кавитации при истечении под уровень.

Внешний цилиндрический насадок может быть значительно улучшен путем закругления входной кромки или устройства конического входа. На рис.5.9 даны различные типы насадков и указаны значения соответствующих коэффициентов.

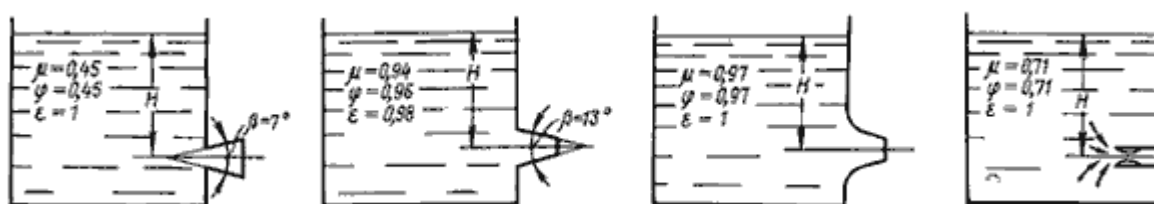


Рис. 5.9. Истечение жидкости через насадки а - расширяющиеся конические; б - сужающиеся конические; в - коноидальные; г - внутренние цилиндрические

Конически сходящиеся и коноидальные насадки применяют там, где необходимо получить хорошую компактную струю сравнительно большой длины при малых потерях энергии (в напорных брандспойтах, гидромониторах и т.д.). Конически сходящиеся насадки используют для увеличения расхода истечения при малых выходных скоростях.

5.5. Истечения через отверстия и насадки при переменном напоре (опорожнение сосудов)

Рассмотрим случай опорожнения открытого в атмосферу сосуда при постоянно уменьшающемся напоре, при котором течение является неустановившемся (рис.5.10).

Однако если напор, а следовательно, и скорость истечения изменяются медленно, то движение в каждый момент времени можно рассматривать как установившееся, и для решения задачи применить уравнение Бернулли.

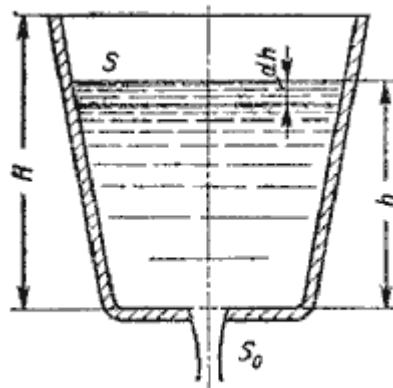


Рис. 5.10. Схема опорожнения резервуара

Обозначим переменную высоту уровня жидкости в сосуде за h , площадь сечения резервуара на этом уровне S , площадь отверстия S_0 , и взяв бесконечно малый отрезок времени dt , можно записать следующее уравнение объемов:

$$S dh = -Q dt$$

или

$$S dh = - \underbrace{\mu S_0 \sqrt{2gh}}_{-Q} \cdot dt$$

где dh - изменение уровня жидкости за время dt .

Отсюда время полного опорожнения сосуда высотой H

$$t = - \frac{1}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_{h=H}^{h=0} S \frac{dh}{\sqrt{h}}$$

Если будет известен закон изменения площади S по высоте h , то интеграл можно подсчитать. Для призматического сосуда $S = const$ (рис.5.11), следовательно, время его полного опорожнения

$$t = \frac{2SH}{\mu S_0 \sqrt{2gH}}$$

Из этого выражения следует, что время полного опорожнения призматического сосуда в два раза больше времени истечения того же объема жидкости при постоянном напоре, равном первоначальному.

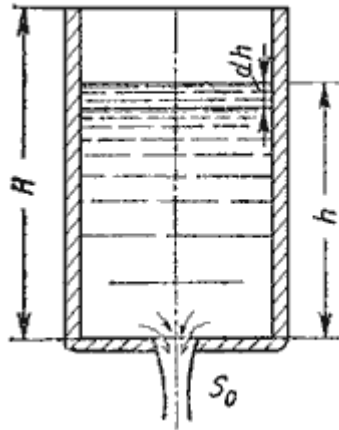


Рис. 5.11. Опорожнение призматического резервуара

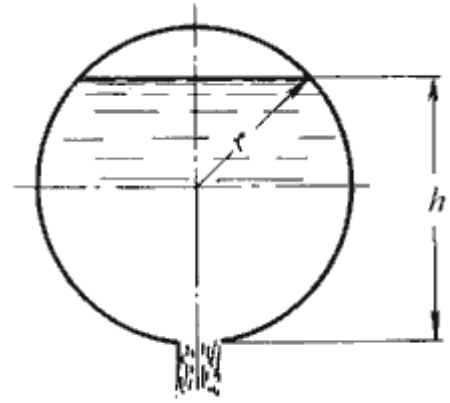


Рис. 5.12. Опорожнение непризматического резервуара

Для определения времени истечения жидкости из горизонтального цилиндрического сосуда (цистерны) (рис. 5.12) выразим зависимость переменной площади S от h :

$$S = 2l\sqrt{h(D-h)}$$

где l - длина цистерны; D - диаметр цистерны.

Тогда время полного опорожнения такой цистерны, т.е. время изменения напора от $h_1 = D$ до $h_2 = 0$, получится равным

$$t = \frac{4lD\sqrt{D}}{3\mu S_0\sqrt{2g}}$$

5.6. Истечение из-под затвора в горизонтальном лотке

Во многих водозаборных и водопропускных гидротехнических сооружениях расходы воды проходят через отверстия, перекрываемые затворами. Затворы поднимают на определенную высоту над дном и пропускают через отверстия необходимые расходы. Чаще всего на гидромелиоративных сооружениях устраивают отверстия прямоугольного сечения, истечение из которых и рассмотрим.

Отверстия могут быть незатопленными (истечение свободное) и затопленными, когда уровень воды за затвором влияет на истечение.

Если отверстие незатопленное, то вытекающая из-под затвора струя находится под атмосферным давлением (рис. 5.13). При истечении через затопленное отверстие струя за затвором находится под некоторым слоем воды (рис. 5.14).

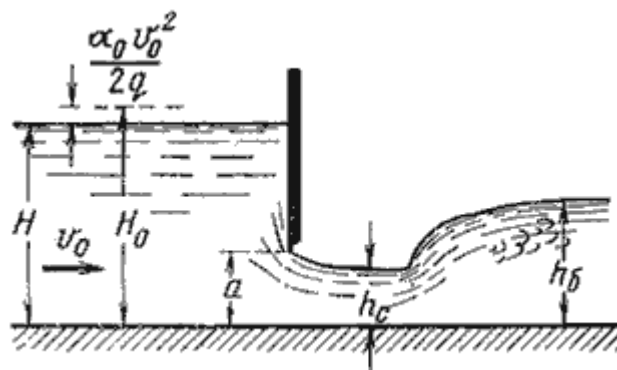


Рис. 5.13. Истечение из-под затвора через незатопленное отверстие

Когда затвор приподнят над дном, вытекающая из-под него струя испытывает сжатие в вертикальной плоскости. На расстоянии, примерно равном высоте отверстия a (высоте поднятия затвора), наблюдается наиболее сжатое сечение. Глубина в сжатом сечении h_c связана с высотой отверстия a следующей зависимостью:

$$h_c = \epsilon' a$$

где ϵ' - коэффициент вертикального сжатия струи.

Коэффициент вертикального сжатия ϵ' зависит от отношения высоты отверстия a к напору (глубине воды перед затвором) H . Для ориентировочных расчетов можно принимать $\epsilon' = 0,64$.

Если составить уравнение Бернулли для сечений, проведенных перед затвором и в сжатом сечении, после преобразований получим:

$$v_c = \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_c)}$$

где φ - коэффициент скорости,

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta_c}}$$

где H_0 - напор с учетом скорости подхода,

$$H_0 = H + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g}$$

Тогда расход при истечении из-под затвора при незатопленном отверстии определится по формуле:

$$Q = S_{отв} v_c = ab \epsilon' \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_c)}$$

где S - площадь отверстия, $S = ab$.

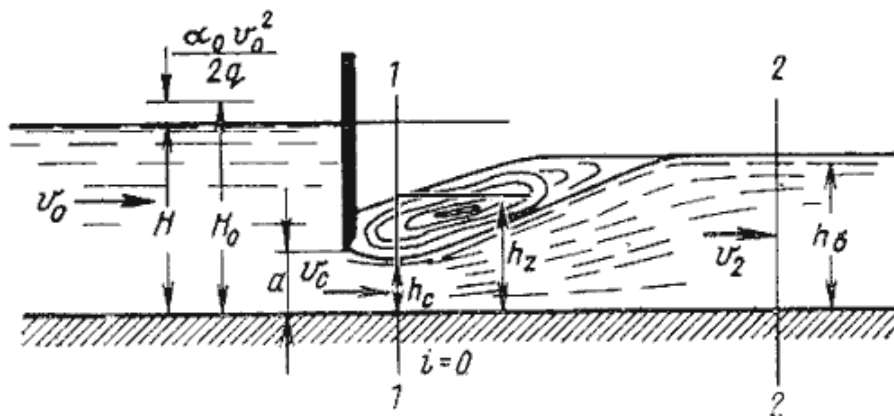


Рис. 5.14. Истечение из-под затвора при затопленном отверстии

При истечении через затопленное отверстие (рис. 5.14) расход определится по формуле:

$$Q = ab\mu\sqrt{2g(H_0 - h_z)}$$

где h_z - глубина в том сечении, где наблюдается максимальное сжатие истекающей из-под затвора струи.

Глубина h_z определяется из зависимости

$$h_z = \sqrt{h_0^2 - M\left(H_0 - \frac{M}{4}\right)} + \frac{M}{2}$$

в которой

$$M = 4\mu^2\alpha^2 \frac{h_0 - h_c}{h_0 h_c}$$

а h_0 - глубина в отводящем канале (бытовая глубина).

5.7. Давление струи жидкости на ограждающие поверхности

Если вытекающая из отверстия или насадка струя попадает на неподвижную стенку, то она с определенным давлением воздействует на нее. Основное уравнение, по которому вычисляется давление струи на площадку, имеет вид

$$P = \frac{\gamma}{g} Qv$$

На рис. 5.15 приведены наиболее часто встречающиеся в практике ограждающие поверхности (преграды) и уравнения, по которым вычисляется давление струи на соответствующую поверхность.

Величина давления струи, естественно, зависит от расстояния насадка до преграды. С увеличением расстояния струя рассеивается и давление уменьшается. Соответствующие исследования показывают, что в данном случае струя может быть разбита на три характерные части: компактную, раздробленную и распыленную (рис.5.16).

В пределах компактной части сохраняется цилиндрическая форма струи без нарушения сплошности движения. В пределах раздробленной части сплошность потока нарушается, причем струя постепенно расширяется. Наконец, в пределах распыленной части струи происходит окончательный распад потока на отдельные капли.

a)		$P = \frac{\gamma}{g} Qv$
b)		$P = \frac{\gamma}{g} Qv(1 - \cos \beta)$
в)		$P = \frac{\gamma}{g} Qv(1 - \cos \beta)$
г)		$P = \frac{\gamma}{g} Qv(1 + \cos \beta)$
д)		$P = \frac{2\gamma}{g} Qv$
e)		$P = \frac{2\gamma}{g} Qv$
жс)		$P = \frac{\gamma}{g} Qv \sin \alpha$

Рис. 5.15. Взаимодействие струи жидкости с неподвижной поверхностью

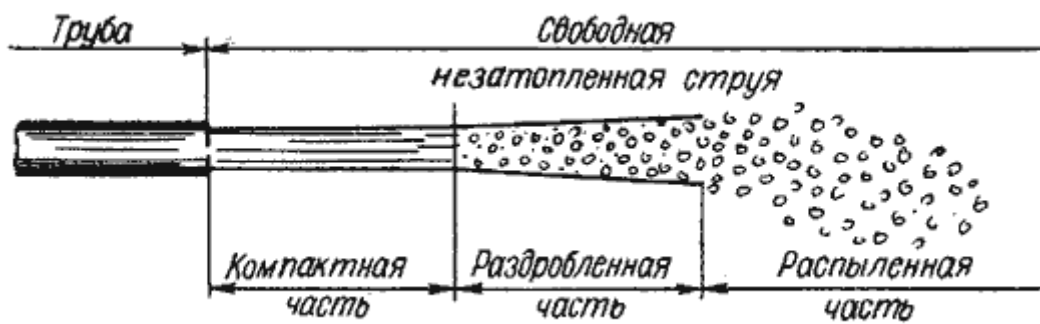


Рис. 5.16. Составные части свободной струи

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 *a* 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.

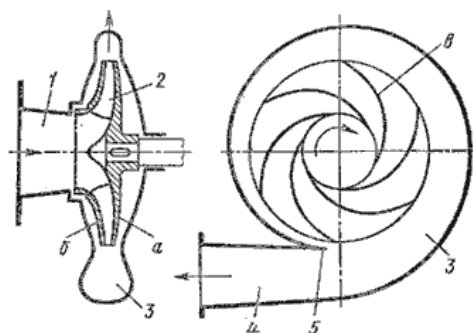


Рис. 6.1. Схема центробежного насоса

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.

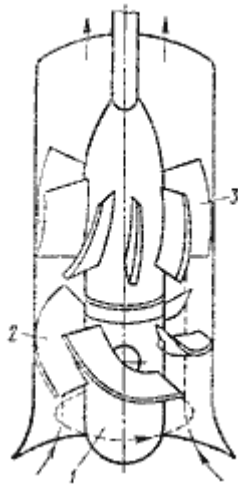


Рис. 6.2. Схема осевого насоса

Осевые насосы могут быть жестколопастными, в которых положение лопастей рабочего колеса не изменяется, и поворотнo-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.

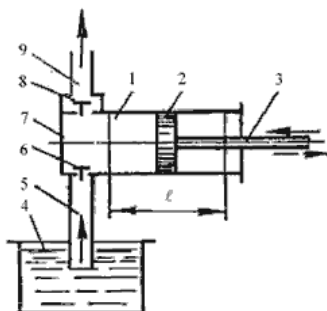


Рис. 6.3. Насос поршневой простого действия

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.

Так как каждому обороту двигателя соответствует два хода поршня, из которых лишь один соответствует нагнетанию, то теоретическая производительность в одну секунду будет

$$Q_T = \frac{Fln}{60} \text{ (м}^3\text{/сек),}$$

где F - площадь поршня, м²;

l - ход поршня, м;

n - число оборотов двигателя, об/мин.

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:

$$\eta_o = \frac{Q}{Q_T}$$

Объемный КПД - основной экономический показатель, характеризующий работу насоса.

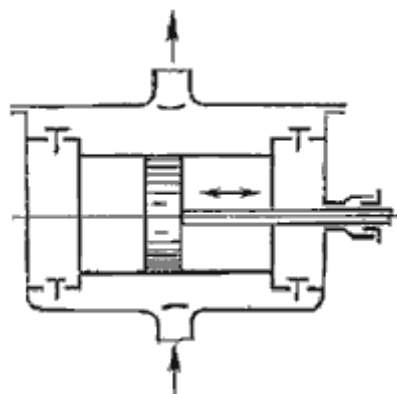


Рис. 6.4. Насос поршневой двойного действия

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. Теоретическая производительность насоса двойного действия будет

$$Q_r = \frac{Fln}{60} + \frac{(F-f)ln}{60} \text{ (м}^3\text{/сек)}$$

где f - площадь штока, м².

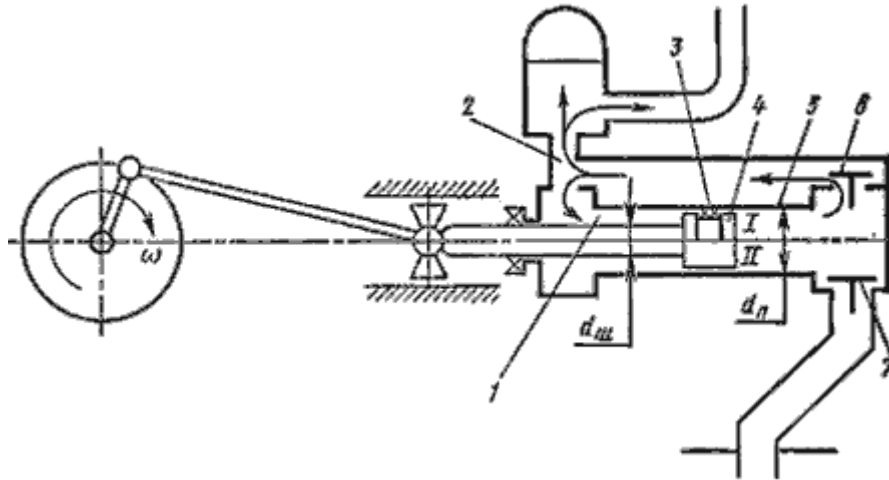


Рис. 6.5. Схема поршневого насоса с дифференциальным поршнем

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 I. 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 . Таким образом, за оба хода поршня в нагнетательный трубопровод будет подан объем жидкости, равный

$$(F - f)l + fl = Fl$$

т.е. столько же, сколько подается насосом простого действия. Разница лишь в том, что это количество жидкости подается за оба хода поршня, следовательно, и подача происходит более равномерно.

6.3. Индикаторная диаграмма поршневых насосов

Рабочий цикл поршневого насоса может быть графически описан на бумаге специальным прибором - индикатором. График изменения давления в цилиндре за один полный оборот кривошипа называется *индикаторной диаграммой*. На рис. 6.6 показана такая диаграмма насоса простого действия.

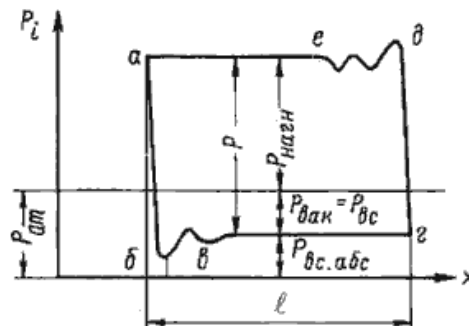


Рис. 6.6. Индикаторная диаграмма

При движении поршня слева направо (см. рис.6.3) (процесс всасывания) давление в цилиндре насоса резко падает до давления всасывания $P_{вс}$ по линии ab . Из-за податливости стенок цилиндра и сжимаемости жидкости линия ab не вертикальна, а слегка наклонена и переходит затем в волнистую линию bc . Далее на всасывающей линии поддерживается постоянное давление и линия bc остается практически горизонтальной на протяжении всего хода всасывания. При обратном движении поршня (ход нагнетания) давление в цилиндре от $P_{вс}$ поднимается до давления $P_{нагн}$ по прямой cd , наклон которой влево от вертикали объясняется теми же самыми причинами, что и для линии ab . Начало сжатия жидкости сопровождается колебаниями давления в цилиндре (линия de). В дальнейшем давление $P_{нагн}$ остается неизменным на протяжении всего хода нагнетания (линия ea). При повторном рабочем цикле этот график будет повторяться.

Неисправности, возникающие в гидравлической части поршневого насоса изменяют характер индикаторной диаграммы. Анализируя различные индикаторные диаграммы с теми или иными аномалиями, можно безошибочно сказать о неисправности насоса.

6.4. Баланс энергии в насосах

Баланс мощности в насосе наглядно можно представить в виде схемы, представленной на рис 6.7.

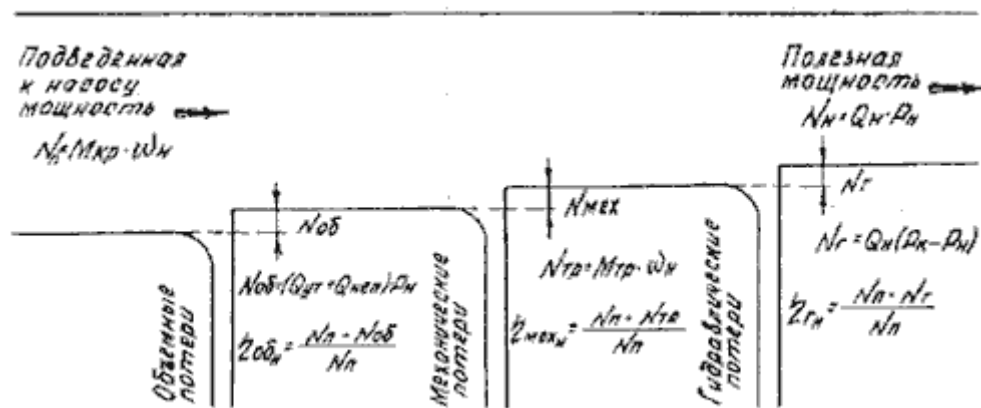


Рис. 6.7. Баланс мощности насоса

Мощность, которая подводится к валу насоса называется *подведенной*. Она равна произведению крутящего момента на валу на его угловую скорость

$$N_{\Pi} = M_{кр} \omega$$

Мощность, которую мы получаем от насоса в виде потока жидкости под давлением называется *полезной мощностью насоса* (в дальнейшем просто мощностью)

$$N_H = Q_H P_H$$

Отношение мощности насоса к подведенной мощности называется общим КПД насоса

$$\eta_{общ} = \frac{N_H}{N_{\Pi}}$$

а разность $N_{\Pi} - N_H = N_{пот}$ называется потерями мощности в насосе. Потери мощности в насосе делятся на объемные, механические и гидравлические.

Потери мощности на внутренние утечки и неполное заполнение камер насоса

$$N_{об} = (Q_{ут} + Q_{нен})P_H$$

Объемный КПД насоса определится из соотношения

$$\eta_{об} = \frac{N_{II} - N_{об}}{N_{II}}$$

Для современных насосов объемный КПД находится в пределах 0,92...0,96. Значения КПД приведены в технических характеристиках насосов.

Механические КПД характеризует потери на трение в подвижных соединениях между деталями насоса. При относительном перемещении соприкасающихся поверхностей в зоне их контакта всегда возникает сила трения, которая направлена в сторону, противоположную движению. Эта сила расходуется на деформацию поверхностного слоя, пластическое оттеснение и на преодоление межмолекулярных связей соприкасающихся поверхностей.

Мощность, затраченная на преодоление сил трения, определяется

$$N_{тр} = M_{тр}\omega,$$

где $M_{тр}$ - момент трения в насосе;
 ω - угловая скорость вала насоса.

Механический КПД определяется из соотношения

$$\eta_{мех} = \frac{N_{II} - N_{тр}}{N_{II}}$$

Для современных насосов механический КПД также находится в пределах 0,92...0,96.

Гидравлический КПД характеризует потери на деформацию потока рабочей жидкости в напорной камере и на трение жидкости о стенки сосуда. Эти потери примерно на порядок ниже механических потерь на трение и часто в инженерных расчетах не учитываются или объединяются с механическими потерями на трение. В этом случае объединенный КПД называется *гидромеханическим*.

Мощность, затраченная на гидравлические потери, определится

$$N_z = Q_H (P_K - P_H),$$

где P_K - давление в напорной камере насоса;
 P_H - давление в напорной гидролинии на выходе из насоса.

Гидравлический КПД определяется из соотношения

$$\eta_z = \frac{N_{II} - N_z}{N_{II}}$$

Общий КПД насоса равен произведению КПД объемного, гидравлического и механического

$$\eta = \eta_{об} + \eta_{мех} + \eta_{г}$$

Таким образом, баланс мощности насоса дает представление о потерях, возникающих в насосе, общем КПД и всех его составляющих.

6.5. Обозначение элементов гидро- и пневмосистем

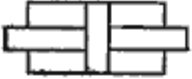
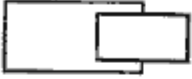

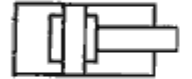
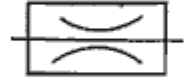

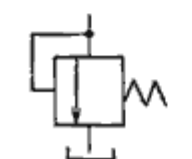
Кроме насосов и гидромоторов существуют и другие разнообразные по конструкции и назначению гидроэлементы. Одни управляют потоком рабочей жидкости, другие служат для обеспечения безотказной работы гидросистем и т.д. Совокупность этих устройств называется *гидроприводом* и требует отдельного изучения. Все гидроэлементы имеют свое условное обозначение, из которых составляются гидросхемы по аналогии с электрическими схемами.

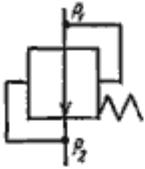




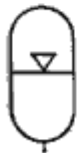

Ниже приводятся условные обозначения основных гидроэлементов.






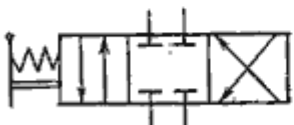

Таблица 6.1

Условные обозначения основных гидроэлементов

Обозначение	Описание элемента
	Гидронасос нерегулируемый с постоянным направлением потока
	Гидронасос нерегулируемый с реверсивным направлением потока
	Гидронасос регулируемый
	Гидромотор нерегулируемый с постоянным направлением потока
	Гидромотор нерегулируемый с реверсивным направлением потока
	Гидромотор регулируемый
	Гидроцилиндр поршневой с односторонним штоком

	Гидроцилиндр поршневой с двухсторонним штоком
	Гидроцилиндр плунжерный
	Гидроцилиндр телескопический
	Гидроцилиндр с торможением в конце хода
	Дроссель настраиваемый
	Дроссель регулируемый
	Клапан напорный

	<p>Клапан перепада давлений ($P_1 - P_2 = \text{const}$)</p>
	<p>Клапан обратный</p>
	<p>Гидрозамок</p>
	<p>Гидроаккумулятор грузовой</p>
	<p>Гидроаккумулятор пружинный</p>
	<p>Гидроаккумулятор пневмогидравлический</p>
	<p>Фильтр</p>

	Теплообменник
	Гидропреобразователь
	Гидробак с атмосферным давлением
	Гидробак с давлением выше атмосферного
	Гидрораспределитель четырехлинейный двухпозиционный с управлением от кулачка
	Гидрораспределитель четырехлинейный трехпозиционный с ручным управлением и перекрытым потоком в исходной позиции
	Гидрораспределитель четырехлинейный трехпозиционный с электромагнитным управлением и закольцованным потоком в исходной позиции

На рис. 6.8 изображен составленный из условных обозначений пример гидравлической схемы привода поворота стрелы челюстного погрузчика.

Схема состоит из бака, нерегулируемого гидромотора, трехпозиционного гидрораспределителя, двух регулируемых дросселей с параллельно подключенными к ним обратными клапанами, двух гидроцилиндров, фильтра и предохранительного клапана.

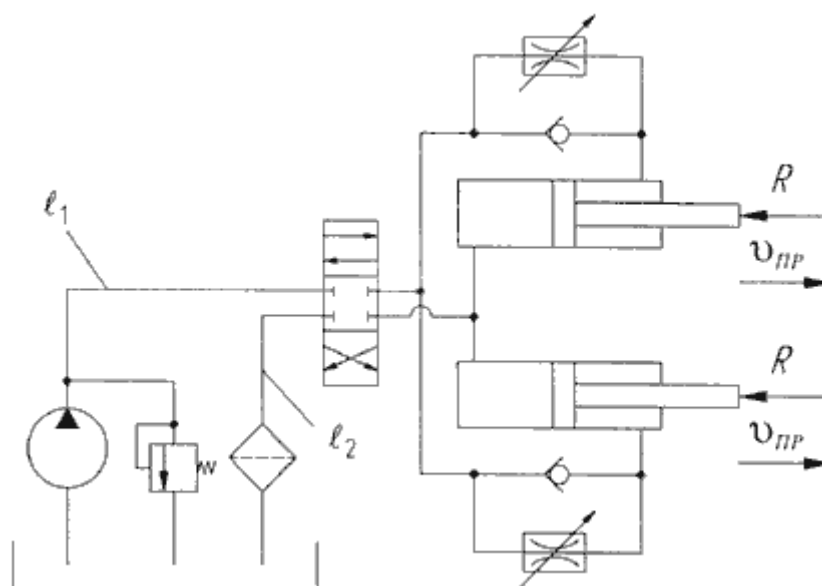


Рис.6.8. Гидросхема привода поворота стрелы

Принцип работы гидропривода заключается в следующем. Из бака рабочая жидкость (масло) забирается насосом и подается к гидрораспределителю. В нейтральном положении золотника гидрораспределителя при работающем насосе на участке трубопровода между насосом и распределителем начинает увеличиваться давление, при этом срабатывает предохранительный клапан и жидкость сливается обратно в бак. При смене позиции золотника (нижняя позиция на схеме) открываются проходные сечения в гидрораспределителе, и жидкость начинает поступать в полости нагнетания гидродвигателей (поршневые полости гидроцилиндров). Из штоковой полости гидроцилиндров масло по гидролинии слива проходит через регулируемые дроссели, гидрораспределитель и, очищаясь фильтром, попадает на слив в бак.

Скорость поступательного движения штоков гидроцилиндров регулируется дросселями. Реверсирование движения штоков осуществляется путем переключения позиций гидрораспределителя. При обратном движении штоков без нагрузки их скорость не регулируется и зависит от расхода рабочей жидкости в штоковые полости. При аварийной остановке штоков (например, непреодолимое усилие) давление в системе возрастает, вызывая тем самым открытие предохранительного клапана и сброс рабочей жидкости в бак.

7. ВОДОПОТРЕБИТЕЛИ

7.1 Виды потребителей воды

На территории города, поселка, промышленного предприятия расположены водопотребители различных категорий, предъявляющие неодинаковые требования к качеству и количеству потребляемой воды.

Водопотребители делятся на три основные категории:

- хозяйственно-питьевые;
- производственные (для удовлетворения технических целей на предприятиях промышленности, транспорта, энергетики);
- пожарные для создания пожаро-взрывобезопасных условий жилого и производственного сектора города.

Для тушения пожаров водой используют:

- передвижные средства тушения пожаров [воду в очаг пожара подают операторы (ствольщики) по временно проложенным насосно-рукавным системам];
- стационарные установки тушения пожаров в зданиях (с автоматическим, полуавтоматическим и ручным включением подачи воды);
- установки водопенного тушения пожаров;
- установки для тушения пожаров водно-химическими растворами;
- оборудование для создания водяных завес, предотвращающих опасность теплового излучения пламени или снижающих температуру нагретых газов;
- оборудование водоорошения для повышения огнестойкости строительных конструкций и технологических установок во время пожара;
- оборудование водонаполнения стальных конструкций замкнутого профиля.

Процесс подачи воды для тушения пожаров и создания условий пожарной безопасности зависит от следующих факторов:

- пожарной опасности сгораемых веществ и материалов;
- площади пожара;
- характера объемно-планировочных и строительных решений;
- квалификации операторов и опыта организации тактических решений при подаче воды передвижными средствами;
- уровня оснащения техническими средствами для отбора, подачи и распределения воды на пожаре и других факторов.

При определении требуемого количества воды выбирают наиболее весомые факторы, достаточно объективно отражающие процессы горения и тушения пожаров и вероятностный характер процесса потребления воды на пожарные нужды.

При решении задачи использования воды на пожарные нужды ее подразделяют на частные подзадачи.

Для математического описания используют два метода.

Первый основан на использовании физико-химических закономерностей, второй – на описании процесса с помощью математических выражений, учитывающих случайные факторы.

Первый метод основан на изучении процессов тепло- и массопереноса при возникновении пожара. Математическое описание в этом случае состоит из уравнений материального и теплового балансов. Например, в основу описания процесса тушения пожара положено уравнение теплового баланса, а процесса повышения огнестойкости конструкций водонаполнением — уравнение теплопередачи от среды пожара к наружной поверхности водонаполненной конструкции.

7.2 Расход воды для тушения пожаров передвижными средствами

Для обеспечения гарантированной и бесперебойной работы водопровода во время пожара его водопроводные сооружения и оборудование рассчитывают на пропуск требуемого количе-

ства воды. Причем сооружения должны подавать воду под соответствующим напором в течение времени, достаточного для тушения пожара.

Параметры водопроводных сооружений противопожарного водопровода определяют на пропуск расхода воды, необходимой для внутреннего, наружного и автоматического тушения пожаров:

$$Q_n = Q_v + Q_n + Q_a,$$

Q_v - расход воды для тушения пожаров внутри зданий (от внутренних пожарных кранов);

Q_n — расход воды для тушения наружных пожаров (от пожарных гидрантов);

Q_a — расход воды для тушения пожаров автоматическими или стационарными установками.

Расход воды для тушения пожара зависит от характера развития пожара и условий подачи воды в очаг горения. Чем выше пожарная опасность объекта, тем больше требуется воды для тушения пожара.

Подавая в очаг пожара значительное количество воды, можно ликвидировать его в течение сравнительно короткого промежутка времени. Однако для строительства водопроводов, рассчитанных на пропуск большого количества воды, необходимы значительные материальные затраты.

Если предусмотреть незначительные расходы воды для тушения пожаров, можно сократить капитальные затраты на строительство водопровода, но при этом трудно создать нормальные условия для борьбы с пожарами. Пожары в этих случаях носят затяжной характер и сопровождаются большими ущербами от уничтожения огнем материальных ценностей, нарушения нормального технологического цикла при аварии, вызванной пожаром.

Поэтому расход воды для тушения пожаров назначают в зависимости от пожарной опасности объекта и его значимости, а также исходя из условия обеспечения требуемой пожарной безопасности при наименьших затратах на строительство и эксплуатацию противопожарных водопроводов.

Расход воды для тушения пожара приведен в нормативных документах, которые составлены на основании обработки статистических данных о фактических расходах воды с учетом создания требуемых условий тушения пожаров на различных объектах.

Ниже приведены данные о фактическом расходе воды для тушения пожаров на открытых технологических установках.

Число пожаров, % 70 85 90 94 95 97

Расход воды, л/с 44 60 81 98 116 128

Расход воды для тушения пожаров в населенных местах зависит от численности населения и характера застройки (табл. 1.1).

Расход воды для наружного пожаротушения в производственных зданиях с фонарями и в зданиях шириной до 60 м без фонарей зависит от объема здания, степени огнестойкости его строительных конструкций, а также категории пожарной опасности производства, размещенного в здании (табл. 7.2).

Параметры водопроводных сооружений рассчитывают исходя из условия одновременности возникновения пожаров на промышленном предприятии, которую принимают при площади территории предприятия менее 150 га — один пожар, более 150 га — два пожара. Расход воды для наружного пожаротушения в производственных зданиях шириной 60 м без фонарей и более принимают в соответствии с данными табл. 1.3.

Для крупных промышленных предприятий (например, нефтеперерабатывающих заводов, химических комбинатов) создают самостоятельные системы водоснабжения, которые не связаны с городским водопроводом.

Расход воды на наружное тушение пожаров в таких случаях определяют в соответствии с Противопожарными техническими условиями строительного проектирования (ПТУСП). Противопожарные водопроводы таких предприятий обычно рассчитывают исходя из условия подачи воды в пожарные автомобили (при системе низкого давления), для подачи воды пожарными гидрантами (при системе высокого давления), для работы лафетных стволов, а также для туше-

ния пожаров внутри зданий с помощью внутренних пожарных кранов и стационарных систем водяного или пенного тушения пожаров.

Таблица 7.1

Расход воды для тушения наружных пожаров в населенных пунктах городского типа

Число жителей в населенном пункте, тыс. чел.	Расчетное количество одновременных пожаров	Расход воды на наружное пожаротушение в населенном пункте на один пожар, л/с	
		застройка зданиями высотой до двух этажей включительно независимо от степени их огнестойкости	застройка зданиями высотой три этажа и выше независимо от степени их огнестойкости
До 1	1	5	10
Св. 1 " 5	1	10	10
" 5 " 10	1	10	15
" 10 " 25	2	10	15
" 25 " 50	2	20	25
" 50 " 100	2	25	35
" 100 " 200	3	-	40
" 200 " 300	3	-	55
" 300 " 400	3	-	70
" 400 " 500	3	-	80
" 500 " 600	3	-	85
" 600 " 700	3	-	90
" 700 " 800	3	-	95
" 800 " 1000	3	-	100

Примечания:

1. Расход воды на наружное пожаротушение в населенном пункте должен быть не менее расхода воды на пожаротушение жилых и общественных зданий, указанных в табл. 7.2.

2. При зонном водоснабжении расход воды на наружное пожаротушение и количество одновременных пожаров в каждой зоне следует принимать в зависимости от числа жителей, проживающих в зоне.

3. Количество одновременных пожаров и расход воды на один пожар в населенных пунктах с числом жителей более 1 млн. чел. надлежит принимать согласно требованиям органов Государственного пожарного надзора.

4. Для группового водопровода количество одновременных пожаров надлежит принимать в зависимости от общей численности жителей в населенных пунктах, подключенных к водопроводу.

Расход воды на восстановление пожарного объема по групповому водопроводу следует определять как сумму расходов воды для населенных пунктов (соответственно количеству одновременных пожаров), требующих наибольших расходов на пожаротушение согласно.

5. В расчетное количество одновременных пожаров в населенном пункте включены пожары на промышленных предприятиях, расположенных в пределах населенного пункта. При этом в расчетный расход воды следует включать соответствующие расходы воды на пожаротушение на этих предприятиях.

Таблица 7.2

Расход воды для тушения пожаров в производственных зданиях

Степень огнестойкости зданий	Категория помещений по пожарной опасности	Расход воды на наружное пожаротушение производственных зданий с фонарями, а также без фонарей шириной до 60 м на один пожар, л/с, при объемах зданий, тыс. куб.м						
		до 3	св. 3 до 5	св. 5 до 20	св. 20 до 50	св. 50 до 200	св. 200 до 400	св. 400 до 600
I и II	Г, Д,	10	10	10	10	15	20	25
I и II	А, Б, В	10	10	15	20	30	35	40
III	Г, Д	10	10	15	25	35	-	-
III	В	10	15	20	30	40	-	-
IV и V	Г, Д	10	15	20	30	-	-	-
IV и V	В	15	20	25	40	-	-	-

Таблица 7.3

Расход воды для тушения пожаров в зданиях без фонарей

Степень огнестойкости зданий	Категория помещений по пожарной опасности	Расход воды на наружное пожаротушение производственных зданий без фонарей шириной 60 м и более на один пожар, л/с, при объемах зданий, тыс. куб.м								
		до 50	св. 50 до 100	св. 100 до 200	св. 200 до 300	св. 300 до 400	св. 400 до 500	св. 500 до 600	св. 600 до 700	св. 700 до 800
I и II	А, Б, В	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I и II	Г, Д, Е	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Примечания к табл. 7.2 и 7.3: При двух расчетных пожарах на предприятии расчетный расход воды на пожаротушение следует принимать по двум зданиям, требующим наибольшего расхода воды.

Таблица 7.4

Суммарный расход воды для тушения пожаров в производственных зданиях

Назначение расхода воды	Расход воды, л/с, для тушения пожара в здании объемом, тыс.м ³ , до							
	100	200	300	400	500	600	700	800
Наружное пожаротушение	30	40	50	60	70	80	90	100

7.3 Расход воды для тушения пожаров внутри зданий

Расход воды на тушение пожаров внутри жилых, общественных, производственных и вспомогательных зданий принимают в зависимости от производительности (расхода) струи и числа одновременно действующих струй.

Расход воды для внутреннего пожаротушения (л/с на одну струю) в зависимости от вида здания и числа подаваемых струй приведен ниже:

	Число струй	Расход воды
Жилые здания высотой 17—25 этажей	3	5
» » » более 25 ».....	6	5
Административные здания высотой более 50 м и объемом до 50 тыс. м ³	4	5
Административные здания высотой более 50 м и объемом более 50 тыс. м ³	8	5
Гостиницы, пансионаты, санатории, комплексы отдыха высотой более 50 м	3	5
Производственные здания и гаражи высотой до 50 м	2	2,5
Производственные и вспомогательные здания промышленных предприятий высотой более 50 м	8	5

Для тушения пожаров внутри зданий предусматривают внутреннее пожаротушение в общежитиях, гостиницах, пансионатах, административных зданиях, школах-интернатах, санаториях, домах отдыха, больницах и других лечебно-профилактических учреждениях, детских садах-яслях, детских домах, домах ребенка, домах пионеров, спальных корпусах пионерских лагерей и школ-интернатов, музеях, библиотеках, выставочных павильонах, магазинах, кинозалах, предприятиях общественного питания и бытового обслуживания, учебных заведениях, вспомогательных зданиях промышленных предприятий высотой 40—50 м и объемом более 25 тыс.м³, помещениях, расположенных под трибунами на стадионах, спортивных залах объемом более 25 тыс.м³ конференц-залах и актовых залах более 700 мест и актовых залах и конференц-залах, оборудованных стационарной аппаратурой, при вместимости более 500 мест.

Внутренние противопожарные водопроводы могут обеспечивать потребность в воде не только для наружного и внутреннего тушения пожаров, но и для работы установок автоматического тушения пожаров (спринклерно-дренчерных установок, установок тушения пожаров распыленной водой, установок водопенного тушения пожаров). В этих случаях водопровод можно использовать как вспомогательный или основной водопитатель. В табл. 4 приведен суммарный расход воды, необходимой для тушения пожара в бесфонарных производственных зданиях шириной более 6 м.

Расход воды для питания спринклерно-дренчерного оборудования принимают в соответствии с результатами гидравлического расчета систем подачи и распределения воды.

Нормативные требования к расходу воды для тушения пожаров периодически изменяют по мере совершенствования характера строительства, внедрения новых технических средств для борьбы с пожарами, интенсификации пожароопасных производственных процессов и др., причем в отдельных случаях возможно уменьшение требуемого количества воды для тушения пожаров, а в других случаях существенное его увеличение.

7.4 Прогнозирование водопотребления

Водопотребление при тушении пожаров характеризует определенную последовательность подачи воды, которая объединяет три этапа: приведение передвижных средств тушения в действие, локализация пожара и его ликвидация.

Каждому этапу присущи определенные признаки: первому — число и протяженность рукавных линии, необходимых для подачи требуемого количества воды от пожарных гидрантов до очага пожара; второму — периметр пожара (фронт распространения огня) и скорость развития пожара; третьему — удельный расход воды для тушения пожара.

В ряде случаев потребление воды характеризуется не столько параметрами пожара, сколько случайными факторами, определяющими техническое состояние техники и психологическое состояние пожарных. Практика показывает, что количество расходуемой во время реального

пожара воды в 4—5 раз превышает количество воды, расходуемой при тушении опытных (учебных) пожаров

Потребление воды при тушении пожаров в реальной обстановке достигает 500—875 л/м². Потребление воды резко возрастает при тушении крупных пожаров.

На основе обработки статистических данных установлено, что расход воды для тушения пожара Q (л/с) зависит в основном от объема W (м³) горящего помещения

$$Q = 0,0223W. \quad (1)$$

Рассмотренные данные свидетельствуют о преобладающем влиянии случайных факторов на процесс водопотребления при тушении пожаров передвижными средствами, поэтому вопросы водопотребления целесообразно рассматривать с привлечением теории вероятностей и математической статистики.

Полученные Ивановым Е.Н. средние значения Q (л/с) приведены ниже:

Жилые и общественные здания (высотой до двух этажей)..... 11,24

То же (высотой три этажа и более)18,63

Промышленные здания I и II степеней огнестойкости22,14

То же, IV и V степеней огнестойкости26,05

Таким образом, в жилых и общественных зданиях повышенной этажности расход воды больше, чем в зданиях с небольшой (до двух этажей) этажностью. Расход воды для тушения пожаров на промышленных предприятиях зависит от степени огнестойкости строительных конструкций. В зданиях со сгораемыми конструкциями (IV—V степень огнестойкости) расход воды больше, чем в зданиях из негорящих строительных конструкций.

Анализ фактических расходов воды для тушения пожаров в городах показал, что численность населения не влияет на величину расхода воды, в то время как действующими нормами расход воды установлен в зависимости от численности населения города. В то же время фактический расход воды, наблюдаемый в процессе тушения отдельных пожаров, превышает нормативный расход воды. Это положение в первую очередь относится к расходу воды для тушения пожаров на промышленных предприятиях повышенной пожарной опасности.

7.5 Расход воды на хозяйственно-бытовые и производственные нужды.

Подача воды из коммунального водопровода должна быть достаточной для обеспечения: хозяйственно-бытовых нужд в жилых зданиях; водопотребления в общественных зданиях; расхода на поливку улиц и насаждений, на работу фонтанов и т. п.; хозяйственно-питьевого водопотребления на предприятиях; водопотребления промышленных предприятий, получающих воду для технологических нужд от городской водопровода и т. п.

Нормы потребления воды (количество воды, расходуемой водопотребителем в течение суток) принимают в соответствии с требованиями СНиП в зависимости от степени благоустройства жилых зданий и от оборудования производственных цехов (технологии производства).

Средний суточный расход воды $Q_{cp}^{сут}$ в населенном месте зависит от нормы водопотребления и расчетного числа жителей:

$$Q_{cp}^{сут} = q_{cp.сут} \times M, \quad (2)$$

$q_{cp.сут}$ — среднесуточная норма водопотребления;

M — число жителей на расчетный период.

Суточный расход воды на технологические нужды промышленного предприятия определяют по формуле

$$Q_{cp}^{np} = q_0 \times n \times \tau, \quad (3)$$

q_0 — норма водопотребления на единицу продукции;

n — часовая продукция предприятия;

τ — число часов работы предприятия в сутки.

Расходование воды в населенных местах и предприятиях происходит неравномерно в течение суток года и в течение часов суток. Для расчета элементов системы водоснабжения уста-

навливают пределы возможных колебаний расхода воды в отдельные часы суток. Расчет параметров водопроводных сооружений производят на максимальный часовой расход воды в дни максимального водопотребления, который определяется по формуле

$$Q_{сут}^{макс} = K \times q_{сут.макс} \times M / 24, \quad (4)$$

K - коэффициент часовой неравномерности, показывающий во сколько раз максимальный часовой расход превышает средний.

Неравномерность водопотребления в населенных местах зависит от численности населения и степени их благоустройства. Так, в больших городах неравномерность водопотребления меньше, чем в городах с небольшим населением. Это объясняется тем, что, с увеличением численности потребителей сглаживаются колебания водопотребления, и разница между максимальным и средним водопотреблением уменьшается. Неравномерность водопотребления выражают графиками (рис. 1.1), на которых по оси абсцисс откладывают время в часах, а по оси ординат — расходы воды в процентах от полного суточного расхода. Средний часовой расход воды применительно к графикам водопотребления равен 4,17 % (определяют делением 100% на 24 ч суток).

При расчете режимов работы систем водоснабжения (насосно-силового оборудования, запасающих и регулирующих емкостей, водопроводной сети и т. п.) по графикам водопотребления для каждой категории потребителей, получающих воду из водопровода, строят суммарный график водопотребления и находят часовые (секундные) расходы воды в целом и по отдельным группам потребителей.

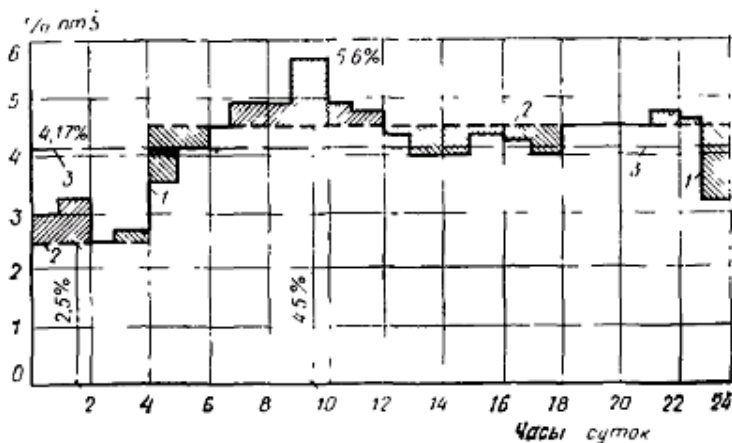


Рисунок 7.1 – График подачи и потребления воды по часам суток
1- потребление воды, 2 – подача воды, 3 – среднесуточное потребление воды

Подача полного расчетного расхода воды для тушения пожара должна быть обеспечена при наибольшем часовом расходе воды на другие нужды. При этом расходы воды на поливку территории, прием душей, мытье полов в производственных зданиях и мойку технологического оборудования не учитывают.

8. РУКАВНО-НАСОСНЫЕ СИСТЕМЫ

8.1 Виды насосно-рукавных систем

Воду из водопровода отбирают через пожарный гидрант передвижными пожарными автонасосами или мотопомпами (рис. 8.1). При отсутствии водопровода с достаточным для тушения пожара расходом воду забирают передвижными пожарными насосами из естественных (реки, озера, пруды и т. п.) и искусственных водоемов (резервуары, копани и т. д.).

Для нормальной работы передвижных пожарных насосов к водоемам устраивают специальные подъезды и пирсы. Для подачи воды во время пожара предусматривают прокладку насосно-рукавных систем.

Выбор того или иного вида насосно-рукавных систем диктуется характеристикой водопровода (водоотдачей, удаленностью гидранта от очага пожара), характером развития пожара и рядом других показателей, определяющих тактические схемы развертывания техники.

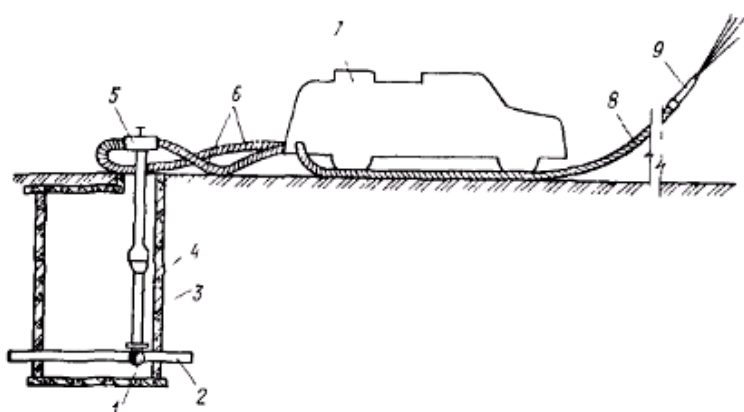


Рисунок – 8.1 – Схема отбора воды из водопровода пожарным насосом

1 — пожарная подставка, 2 — водопровод; 3 — водопроводный колодезь; 4 — пожарный гидрант, 5 — пожарная колонка, 6 — рукавная линия, 7 — пожарный автонасос; 8 — пожарный рукав, 9 — пожарный ствол

Если тушение пожара возможно при подаче небольшого расхода воды, то от передвижного пожарного насоса прокладывают одну рукавную линию. Такой вид насосно-рукавной системы называется простейшим соединением (рис. 8.2, а).

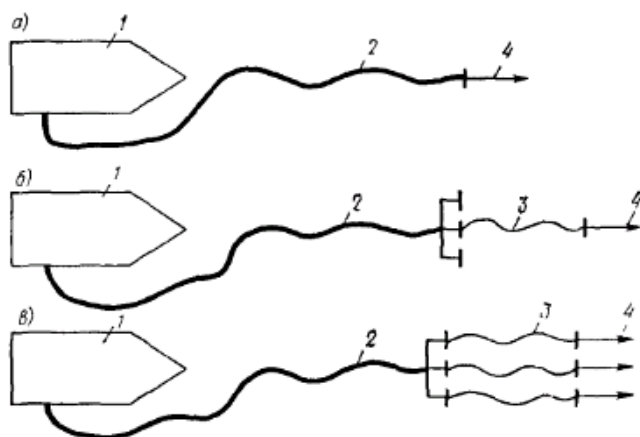


Рисунок 8.2 - Виды насосно-рукавных систем

а — простейшее соединение, б — последовательное соединение, в — смешанное соединение,

1 — насос, 2 — магистральная рукавная линия, 3 — рабочая рукавная линия, 4 — пожарный ствол

Если для тушения пожара воды, содержащейся в автоцистерне пожарного автомобиля, недостаточно, то от передвижного пожарного насоса прокладывают магистральную рукавную линию до места пожара и к ней подсоединяют рабочие рукавные линии.

Если к магистральной рукавной линии подсоединена одна рабочая рукавная линия (см. рис. 8.2, б), то такой вид насосно-рукавной системы называется последовательным соединением.

Если к магистральной рукавной линии подсоединяется несколько рабочих рукавных линий (см. рис. 8.2, в), то такой вид насосно-рукавной системы называется смешанным соединением.

Для борьбы с крупными пожарами применяют лафетные стволы. К таким стволам вода, как правило, подается одновременно по нескольким магистральным линиям. Такой вид насосно-рукавной системы называется параллельным соединением.

8.2 Расчет насосно-рукавных систем

Расчет насосно-рукавных систем сводится к определению требуемого напора насоса в зависимости от расхода воды, подаваемой к месту пожара. Для определения этих параметров строится расчетная схема (рис. 8.3).

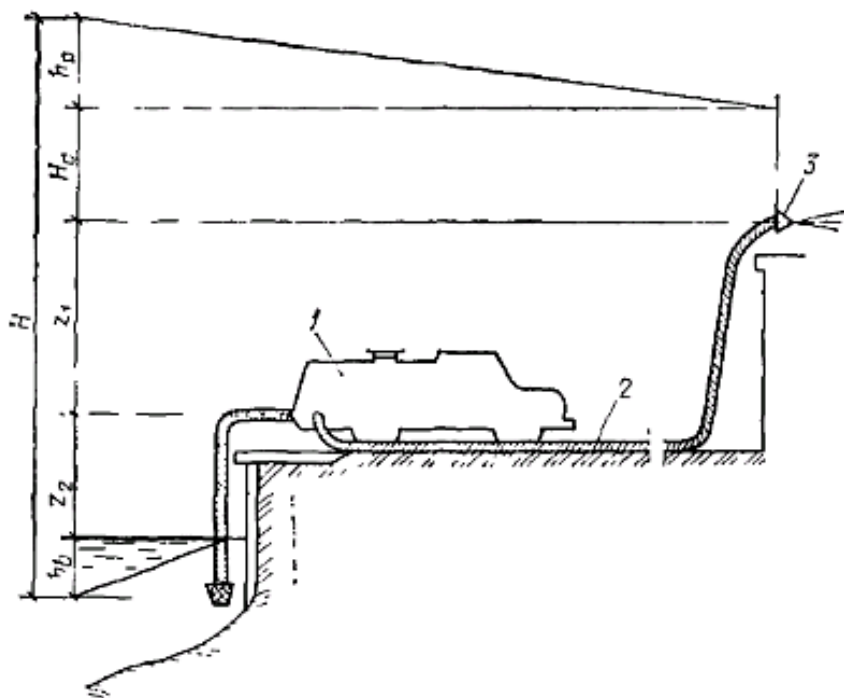


Рисунок 8.3 – Расчетная схема насосно-рукавной системы

1 — пожарный автонасос, 2 - рукавная система; 3 — пожарный ствол

Гидравлические расчеты насосно-рукавных систем сводят к решению трех основных задач.

1. Определение напора насоса, если заданы расчетный расход воды (напор перед пожарным стволом), вид насосно-рукавной системы, а также длина и диаметр рукавов.

2. Определенно расхода воды по заданному напору

насоса.

3. Определение предельной длины насосно-рукавной системы по расчетному расходу воды и напору насоса.

1. Определение напора насоса. Требуемый напор насоса H (м) определяют по формуле

$$H = h_p + H_c + z_1 + z_2 + h_e, \quad (5)$$

h_p — потери напора в рукавной системе;

H_c — свободный напор перед стволом;

z_1 — высота подъема стволов над осью насоса;

z_2 — высота всасывания;

h_e — потери напора во всасывающей линии.

Для практических расчетов напор насоса определяют по формуле

$$H = S_{сuct} Q^2 + z, \quad (6)$$

$S_{сuct}$ — сопротивление рукавной системы, зависящее от вида рукавной системы и диаметра установленных на ней пожарных стволов;

Q — расчетный расход воды; z — высота подъема пожарных стволов над осью насоса

2. Определение расхода воды по заданному напору. При определении расхода воды учитывают характеристику рукавной системы и рабочий режим насоса. Задачи о совместной работе насосов и рукавных систем решают графически и аналитически. При аналитическом решении задач о совместной работе насоса с рукавной системой используют уравнение, характеризующее параметры насоса, и уравнение (6), характеризующее параметры рукавной системы:

$$H = S_{сист} Q^2 + z$$

Для расчета расхода воды, подаваемой насосно-рукавной системой, из уравнения (6) получим формулу

$$Q = \sqrt{(H - z) / S_{сист}} . \quad (7)$$

3. Определение предельной длины рукавной системы. Задачу определения предельной длины рукавной системы решают графически и аналитически, если заданы расчетный расход Q и высота подъема стволов z .

Например, для последовательного соединения рукавов (рис. 8.3. б) напор насоса вычисляется по формуле (6)

$$H = S_{сист} Q^2 + z,$$

где сопротивление системы будет равно

$$S_{сист} = n_p \times s_p,$$

где s_p — сопротивление одной рукавной линии;

n_p — число рукавов.

Решив уравнение (6) относительно n_p , определим предельное число рукавов для данного вида рукавного соединения:

$$n_p = (H - z) / s_p Q^2 .$$

Количество пожарных рукавов в магистральной линии от водоисточника до места пожара определяется по формуле:

$$n = 1,2L/l_p ,$$

где L — расстояние от места пожара до водоисточника, м ;

l_p — средняя длина одного пожарного рукава (обычно $l_p = 20$ м).

8.3 Перекачка воды автономными

При удаленном водоисточнике используют перекачку воды по рукавным линиям несколькими пожарными насосами, включенными последовательно.

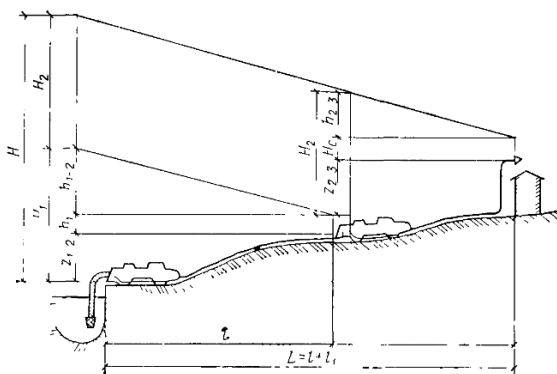


Рисунок 8.4 – Расчетная схема для определения гидравлических параметров насосно-рукавной системы при перекачке воды последовательно включенными пожарными насосами

При перекачке воды первый насос подает воду во всасывающий патрубок второго насоса, а последний подает воду в напорную рукавную линию с пожарными стволами (рис. 2.4). Для бесперебойной работы системы в конце каждой ступени перекачки (у всасывающего патрубка

последующего насоса) должен быть свободный напор h_1 равный 10 м. В конечной ступени перекачки (у пожарного ствола) величину H_c принимают равной напору для создания требуемого расхода воды через пожарный ствол.

Таким образом, напор каждого насоса в системе перекачки складывается из высоты подъема одного насоса над другим z , свободного напора h (или H_c в конце системы перекачки) и потерь напора в рукавных системах h_{1-2} , h_{2-3} и т. д. При решении практических задач определяют число пожарных насосов, работающих в перекачку, и предельные расстояния между ними.

Рассмотрим последовательную работу двух одинаковых пожарных автонасосов (см. рис. 8.4). Начертим расчетную схему (рис. 8.5).

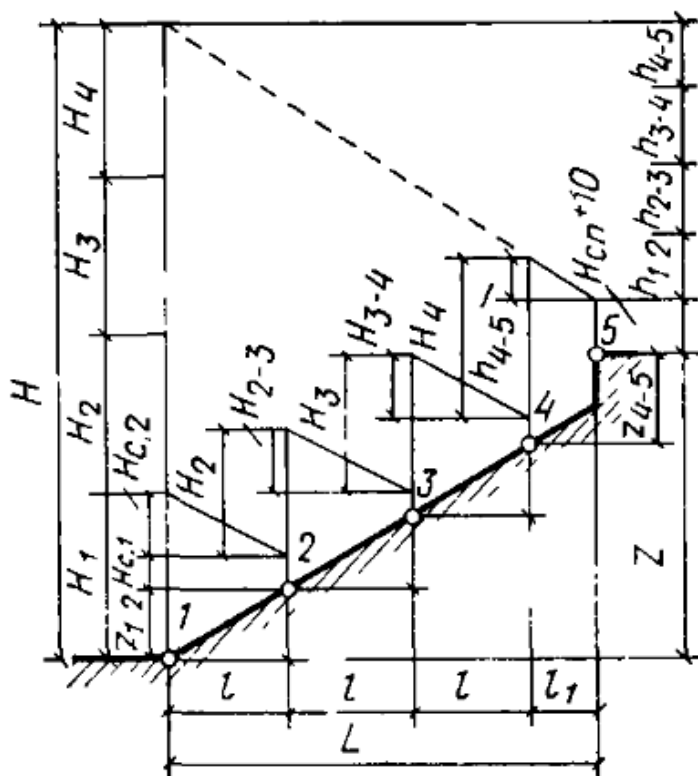


Рисунок 8.5 – Расчетная схема для определения числа насосов, работающих в перекачку: 1, 2, 3, 4, 5 — насосы

Расстояние между водоисточником и местом пожара обозначим через L , а расстояние между автонасосами по линии перекачки — через l , тогда

$$L = ml + l_1 = (\chi - 1)l + l_1,$$

m — число ступеней перекачки;
 χ — число автонасосов равное $m+1$.

Число автонасосов в системе перекачки воды (при одинаковых насосах) определяют по формуле

$$\chi = H/H_1,$$

H — требуемый напор;
 H_1 — напор развиваемый одним насосом.

Требуемый напор для работы насосов в перекачку определяют по формуле

$$H = h + H_c + z,$$

h – потери напора в рукавной линии;

H_c – свободный напор на конце рукавной линии, м;

z – высота подъема пожарных стволов над уровнем водоисточника.

Потери напора в рукавной линии системы перекачки h равны сумме потерь напора в каждой ступени перекачки

$$h = h_{1-2} + h_{2-3} + h_{3-4} + \dots + h_{(m-1)-m},$$

h_{1-2} – потери напора в линии между первым и вторым насосами.

Высоту подъема z представляют в виде равенства

$$z = z_{1-2} + z_{2-3} + z_{3-4} + \dots + z_{(m-1)-m},$$

где z_{1-2} – высота подъема насоса в первой ступени перекачки (индекс указывает номер насоса в системе перекачки)

В конечной ступени перекачки принимают высоту подъема пожарных стволов над осью последнего автонасоса.

Таким образом, для решения задачи должны быть заданы величина L , расчетный расход воды Q и высота подъема пожарных стволов z . Предельное число рукавов между соседними автонасосами при перекачке в одну линию определяют по формулам:

$$\begin{aligned} n_{1-2} &= h_{1-2}/S_o Q^2 ; \\ n_{2-3} &= h_{2-3}/S_o Q^2 ; \\ &\dots\dots\dots ; \\ n_{(m-1)-m} &= h_{(m-1)-m}/S_o Q^2 ; \end{aligned}$$

n – число рукавов между соседними автонасосами;

h_{1-2} – потери напора в рукавной линии между первым и вторым насосами;

S_o – сопротивление одного рукава в линии между насосами;

Q – расход воды

Напор каждого насоса находят по формулам:

$$\begin{aligned} H_1 &= h_{1-2} + z_{1-2} + H_{c1} ; \\ H_2 &= h_{2-3} + z_{2-3} + H_{c2} ; \\ &\dots\dots\dots ; \\ H_{m-1} &= h_{(m-1)-m} + z_{(m-1)-m} + H_{c(m-1)-m} , \end{aligned}$$

H_1 – напор у первого насоса;

h_{1-2} – потери напора в рукавной линии между первым и вторым насосом;

z_{1-2} – высота превышения второго автонасоса над первым;

H_c – свободный напор в конце рукавной линии первого автонасоса.

Свободный напор $H_{c(m-1)}$ в конце рукавной линии, подающей воду к пожарным стволам, принимают равным величине требуемого напора для работы пожарных стволов (при заданном расходе воды).

При перекачке воды по двум параллельным рукавным линиям число рукавов между соседними автонасосами определяют по формулам:

$$\begin{aligned} n_{1-2} &= 4h_{1-2}/S_o Q^2 ; \\ n_{2-3} &= 4h_{2-3}/S_o Q^2 ; \\ &\dots\dots\dots ; \end{aligned}$$

$$n_{(m-1)-m} = 4h_{(m-1)-m}/S_0Q^2 ;$$

Из данной формулы видно, что при перекачке по двум линиям расстояние между автонасосами может быть увеличено в 4 раза по сравнению с перекачкой по одной линии.

8.4 Параллельная работа насосов на лафетные стволы

Для тушения крупных пожаров применяют мощные водяные струи, которые создаются лафетными стволами. Воду к лафетным стволам часто подают несколькими пожарными автонасосами по общей магистральной линии (рис. 2.6, а), либо по самостоятельным рабочим рукавным линиям (см. рис. 2.6, б).

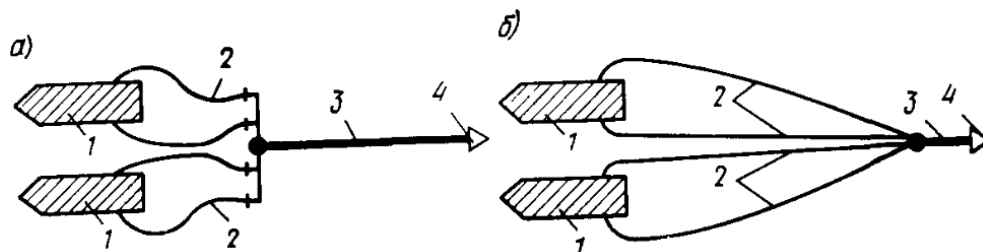


Рисунок 8.6 – Схема подачи воды в лафетный ствол
 а — по общей магистральной линии; б — по самостоятельным рукавным линиям: 1 — насос, 2 — рабочая рукавная линия, 3 — магистральный рукав, 4 — лафетный ствол

При параллельной работе насосов на лафетный ствол приходится решать три задачи.

1. Определение числа пожарных автонасосов при заданной рукавной системе и производительности ствола.
2. Определение наиболее рациональной рукавной системы при заданной производительности ствола и числе пожарных автонасосов.
3. Определение производительности лафетного ствола для заданной насосно-рукавной системы.

9. ПРОТИВОПОЖАРНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

9.1 Классификации систем водоснабжения

Система водоснабжения - комплекс взаимосвязанных устройств и сооружений, обеспечивающих потребителей водой в требуемом количестве и заданного качества. Система водоснабжения включает в себя устройства и сооружения для забора воды из источника водоснабжения, ее транспортирования; обработки, хранения, регулирования подачи и распределения между потребителями.

Схема водоснабжения - последовательное расположение этих сооружений от источника до потребителя, взаимное расположение их относительно друг друга.

Системы водоснабжения должны проектироваться в соответствии с требованиями по проектированию наружных сетей и сооружений водоснабжения, а также других нормативно-технических рекомендаций и требований, предъявляемых к воде потребителями. При этом необходимо учитывать местные условия, многообразие которых приводит к тому, что система водоснабжения любого объекта по-своему уникальна и неповторима.

Все многообразие встречающихся на практике систем водоснабжения классифицируется по следующим основным признакам:

- **по назначению:** хозяйственно-питьевые; противопожарные; производственные; сельскохозяйственные. Перечисленные типы систем могут быть как самостоятельными, так и объединенными. Объединяют системы в том случае, если требования, предъявляемые к качеству воды одинаковые или это выгодно экономически;

- **по характеру используемых природных источников:** системы, получающие воду из поверхностных источников (реки, озера, водохранилища, моря, океаны); системы, забирающие воду из подземных источников (артезианские, грунтовые); системы смешанного питания (при использовании различных видов водоисточников);

- **по территориальному признаку (охвату):** локальные (одного объекта) или местные; групповые или районные, обслуживающие группу объектов; внеплощадочные; внутриплощадочные;

- **по способам подачи воды:** самотечные (гравитационные); напорные (с механической подачей воды с помощью насосов); комбинированные;

- **по кратности использования потребляемой воды (для предприятий):** прямоточные (однократное использование); с последовательным использованием воды (двух-трехкратное); оборотные (многократное использование воды, осуществляемое по замкнутой, полузамкнутой схеме или со сбросом части воды - продувкой); комбинированные;

- **по видам обслуживаемых объектов:** городские; поселковые; промышленные; сельскохозяйственные; железнодорожные и т.д.;

- **по способу доставки и распределения воды:** централизованные; децентрализованные; комбинированные.

Системы водоснабжения в населенных пунктах предусматривают, как правило, централизованными. При этом в зависимости от местных условий и экономической целесообразности они могут быть отдельными - с собственными источниками водоснабжения для каждой из зон (сели-тебной или производственной) - или объединенными - с общим источником водоснабжения для обеих зон (рис. 9.1).

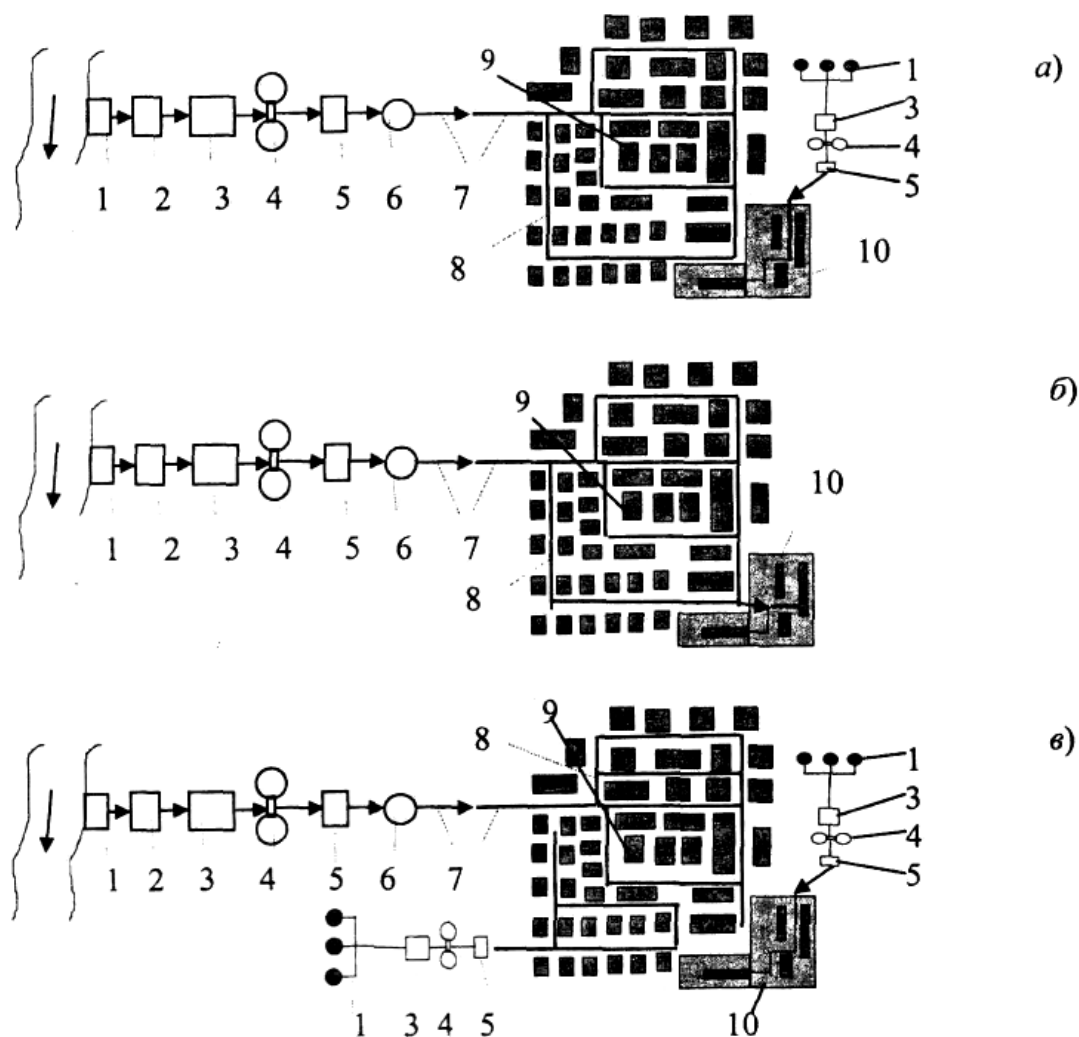


Рисунок 9.1 – Системы водоснабжения: *а* - централизованная раздельная; *б* - централизованная объединенная; *в* - комбинированная: 1 - водозаборное сооружение; 2 - насосная станция НС-1; 3 - очистные сооружения; 4 - резервуары чистой воды; 5 - НС-Н; 6 - водонапорная башня; 7 - водоводы; 8 - распределительная водопроводная сеть; 9 - населенный пункт; 10 - производственная зона.

Децентрализованные (местные) системы водоснабжения строятся для отдельных удаленных локальных потребителей или группы зданий, а также поселков, намеченных к переселению.

По надежности или по степени обеспеченности подачи воды централизованные системы водоснабжения делятся на три категории (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Категория надежности подачи воды

Численность населения, тыс.чел	Категория надежности	Допустимое снижение подачи, %	Длительность снижения подачи, сут.	Допустимый перерыв в подаче воды
>50	I	≤ 30	≤ 3	≤ 10 мин
5-50	II	≤ 30	≤ 10	≤ 6 час
<5	III	≤ 30	≤ 15	≤ 24 час

Системы водоснабжения (водопроводы), используемые одновременно для хозяйственно-питьевого и (или) производственного водоснабжения и для тушения пожаров, или специальный противопожарный водопровод могут быть низкого или высокого давления (рис. 9.2):

а) с подачей воды из водопроводной сети через гидранты низкого давления (при наличии пожарного депо необходимый напор обеспечивается с помощью пожарных автомашин или мотопомп);

б) при отсутствии пожарного депо напор создается стационарными пожарными насосами, установленными в насосных станциях, при этом трубы сети должны быть выбраны с учетом повышения давления при пожаре.

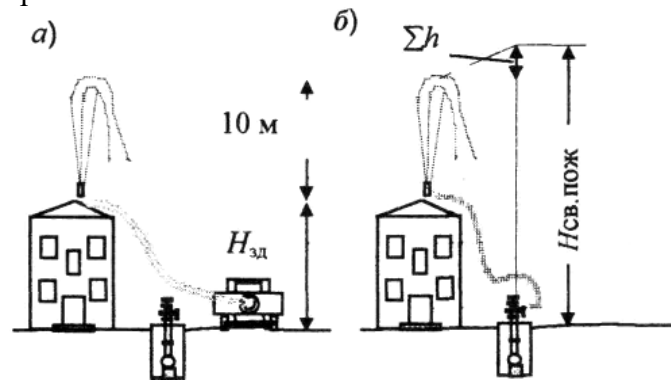


Рисунок 9.2 – Схемы тушения пожара из водопровода: а - низкого давления; б - высокого давления

Специальный противопожарный водопровод может устраиваться с подачей воды непосредственно из противопожарных резервуаров или естественных водоемов (рек, озер, прудов); необходимый напор обеспечивается пожарными автомашинами или мотопомпами.

В населенных пунктах с числом жителей более 5 тысяч человек противопожарный водопровод должен быть низкого давления. Противопожарное водоснабжение поселков с числом жителей до 5 тысяч человек допускается также из естественных или искусственных водоемов или резервуаров с забором воды из них пожарными автонасосами или мотопомпами. В этом случае требуемое число водоемов или резервуаров определяют исходя из того, что радиус их действия не должен превышать при тушении пожара: автонасосами - 200 м, мотопомпами - 100-150 м. Объем каждого резервуара должен быть рассчитан на расход воды, необходимый для тушения пожара в течение 3 часов. Пополняют противопожарные резервуары из хозяйственно-питьевого водопровода. Выбор системы противопожарного водоснабжения обосновывают технико-экономическими расчетами. Для поселков с числом жителей до 50 человек при застройке одно-двухэтажными зданиями, а также для отдельно стоящих производственных зданий I и II степени огнестойкости объемом до 1000 м³ противопожарное водоснабжение можно не предусматривать.

Примерная схема водоснабжения населенного пункта представлена на рис. 9.3.

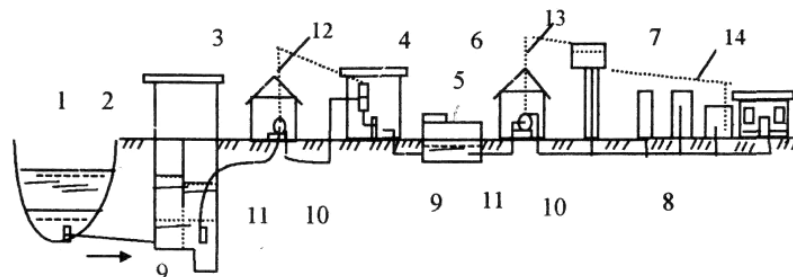


Рисунок 9.3 – Схема водоснабжения населенного пункта при использовании поверхностного водоисточника:

1 - источник водоснабжения; 2 - водозаборное сооружение; 3 - насосная станция I-го подъема; 4 - водоочистная станция; 5 - резервуар чистой воды (РЧВ); 6 - насосная станция II-го подъема; 7 - напорно-регулирующее сооружение (водонапорная башня); 8 - распределительная сеть населенного пункта; 9 - самотечные водоводы; 10 - напорные водоводы; 11 - всасывающие водоводы; 12 - напор насосов I подъема, 13 - напор насосов II подъема, 14 - линия свободных напоров в разводящей сети.

9.2 Водопроводы для наружного пожаротушения

Схемы водопроводов выполняют в зависимости от характера водопровода, который должен обслуживать пожарные нужды, и его назначения.

По способу создания напоров противопожарные водопроводы бывают:

1) высокого давления, которые делятся на:

а) водопроводы постоянного высокого давления;

б) высокого давления, повышаемого только во время пожара. В этом случае давление в водопроводной сети достаточно для непосредственной подачи воды для тушения пожаров от гидрантов, установленных на сети (без помощи привозных насосов);

2) низкого давления (подача воды для тушения от привозных насосов).

Противопожарный водопровод постоянного высокого давления устраивают редко вследствие больших материальных затрат на создание водопроводной сети, обслуживающей только пожарные нужды, и необходимости устройства высокой водонапорной башни или отдельной пневматической установки.

Противопожарный водопровод высокого давления, повышаемого только во время пожара, устраивают главным образом на писчебумажных комбинатах, крупных нефтеперерабатывающих комплексах и других промышленных объектах, характеризующихся высокой пожарной опасностью,

Противопожарный водопровод высокого давления, повышаемого во время пожара, объединяется с хозяйственно-питьевым водопроводом промышленных предприятий. Напор для пожаротушения увеличивается только в хозяйственно-питьевой сети, в промышленном водопроводе напор в это время остается без изменения, поэтому при пожаре не нарушаются производственные процессы, требующие наличия постоянного давления в сети. Строительство противопожарных водопроводов, объединенных с хозяйственно-питьевыми, целесообразно также потому, что хозяйственная сеть, как правило, является более разветвленной, чем производственная, и охватывает наибольшую часть территории объекта. При таких водопроводах наружное пожаротушение может производиться непосредственно от гидрантов без привозных насосов, а внутреннее противопожарное водоснабжение обеспечивается устройством в здании пожарных стояков с пожарными кранами. При этом водонапорную башню устраивают высотой, достаточной для самотечной подачи воды для тушения пожара от внутренних пожарных кранов (в начальной стадии пожара). Бак водонапорной башни во время пожара после пуска пожарного насоса выключается с помощью автоматического приспособления, так как напор, развиваемый пожарным насосом, превышает высоту водонапорного бака.

Противопожарный водопровод высокого давления, объединенный с производственным водопроводом, устраивают в редких случаях, когда при пожаре приходится подавать под высоким давлением все количество воды, необходимой для производственных нужд (как правило, это количество бывает значительным).

Противопожарный водопровод низкого давления, объединенный с хозяйственно-питьевым водопроводом, рассчитывают таким образом, что во время пожара увеличивается только количество подаваемой воды, напор же в сети поддерживается не ниже 10 м. При водопроводах низкого давления выключать водонапорную башню или контррезервуар во время пожара не требуется. Такие водопроводы широко распространены в городах и поселках, где других сетей, кроме хозяйственных, не бывает. Отбор воды для тушения пожаров из таких водопроводов производят с помощью привозных пожарных насосов (автонасосов, мотопомп и др.).

Противопожарный водопровод низкого давления, объединенный с производственным водопроводом, устраивают на производствах, где пожарный расход, по сравнению с производственным, невелик и не влияет на напор производственного водопровода. Однако если для пожарных нужд необходим пуск добавочного насоса, возможно понижение напора в сети, что не всегда допускается требованиями технологии. При рассматриваемой схеме водопровода отбор воды на наружное пожаротушение производится от сети объединенного производственно-

противопожарного водопровода низкого давления, а внутреннее пожаротушение — от внутренних хозяйственно-производственных водопроводов. Такая схема рациональна, потому что внутренняя сеть в этом случае подает воду как на хозяйственно-питьевые нужды, так и на нужды внутреннего пожаротушения.

Противопожарный водопровод объединяют иногда одновременно с хозяйственно-питьевым и производственным водопроводами. В этом случае водопроводная сеть получается единой, и водопроводы могут быть высокого и низкого давления.

Приведенные схемы противопожарных водопроводов применяют в разнообразных комбинациях. Выбор той или иной схемы зависит от характера производства, занимаемой им территории, характеристики пожарной огнеопасности производства, дебита источников водоснабжения и технико-экономических показателей, а также местных условий рассматриваемого объекта.

При больших производственных расходах воды более рациональной в ряде случаев оказывается схема противопожарного водопровода высокого давления, объединенного с хозяйственно-питьевым водопроводом.

Если для объекта допустим пожарный водопровод низкого давления, то он может быть объединен с производственным при условии достаточного охвата водопроводной сетью зданий и сооружений на территории объекта.

На выбор схемы водопровода оказывают влияние характеристики внутреннего противопожарного водопровода, спринклерно-дренчерного оборудования, а также стационарных установок пожаротушения. Кроме того, при выборе противопожарного водопровода необходимо учитывать, имеется ли на объекте или вблизи него пожарная команда.

Водопроводы низкого давления можно сооружать лишь при наличии на объекте или в непосредственной близости от него пожарных команд с передвижными пожарными насосами. Водопроводы высокого давления целесообразно устраивать при отсутствии пожарной команды или при недостатке передвижных пожарных насосов для подачи на тушение пожара полного расчетного количества воды (например, на отдаленных от населенных пунктов объектах). При выборе схемы водоснабжения необходимо учитывать технико-экономические показатели варианта технического решения, включающие капитальные вложения и издержки эксплуатации системы водоснабжения.

В таблице 3.2 даны характеристики противопожарных водопроводов, отражающие преимущества и недостатки вариантов при выборе рациональной схемы.

Таблица 9.2

Преимущества и недостатки вариантов схем противопожарного водопровода

Схема водопровода	Преимущества	Недостатки	Целесообразность применения
1	2	3	4
Специальный противопожарный постоянного высокого давления	Постоянная готовность к подаче воды под необходимым для тушения пожара напором	Низкие показатели экономичности сети водонапорной башни	При благоприятных топографических условиях, для особо опасных в пожарном отношении и важных объектов
Специальный противопожарный высокого давления, создаваемого во время пожара	Возможность подачи воды для тушения пожара непосредственно от гидрантов Независимость от производственных и хозяйственно-питьевых потребителей	Увеличение капитальных затрат отдельной сети труб по сравнению с объединенными водопроводами	На складах с горючими и легковоспламеняющимися материалами
Высокого давления, объединенный с производственным водопроводом	Возможность быстрой подачи воды к месту пожара без применения привозных насосов	Зависимость от культуры обслуживания системы. Возможность использования для тушения пожара воды, необходимой для производственных нужд	При небольших производственных расходах воды, если повышение напора во время пожара не нарушает технологические процессы
Низкого давления, объединенный с производственным водопроводом	Малая зависимость от качества технического обслуживания системы водоснабжения Отсутствие необходимости выключения водонапорной башни	Отсутствие возможности подачи воды для пожаротушения непосредственно из гидрантов без привозных насосов	При развитой водопроводной сети производственного водопровода

Схема водопровода	Преимущества	Недостатки	Целесообразность применения
1	2	3	4
<p>Высокого давления, объединенный с хозяйственно-питьевым водопроводом</p>	<p>Исключение вероятности срыва подачи воды на производственные нужды во время пожара</p>	<p>Сложное техническое обслуживание системы. Необходимость увеличения диаметров труб хозяйственно-питьевой сети</p>	<p>При повышении напора, не нарушающего технологический процесс производства. При развитой хозяйственно-питьевой сети</p>
<p>Низкого давления, объединенный с хозяйственно-питьевым водопроводом</p>	<p>Возможность укладки сети облегченных труб. Удобство эксплуатации и технического обслуживания</p>	<p>Отсутствие возможности подачи воды для пожаротушения непосредственно от пожарного гидранта</p>	<p>В населенных местах при наличии вблизи пожарного депо</p>
<p>Высокого давления, объединенный с производственным и хозяйственно-питьевым водопроводом</p>	<p>Возможность подачи воды непосредственно от гидрантов без привозных насосов. Небольшие капитальные вложения на строительство сети</p>	<p>Сложная и дорогостоящая эксплуатация. Возможность использования воды, предназначенной для тушения пожара, на другие нужды</p>	<p>На предприятиях с небольшими производственными расходами воды. При возможности использования питьевой воды для производственных нужд</p>
<p>Низкого давления, объединенный с производственным и хозяйственно-питьевым водопроводом</p>	<p>Незначительные капитальные вложения и издержки эксплуатации</p>	<p>Возможность использования воды, предназначенной для тушения пожара, на другие цели</p>	<p>При возможности использования питьевой воды для производственных нужд</p>

9.3 Внутренний противопожарный водопровод

Внутренний водопровод должен обеспечивать подачу воды для образования струй, необходимых при тушении пожара. Для этого требуются устройство водонапорной башни с определенным запасом воды, непрерывная работа насосов, или устройство пневматического водоснабжения, заменяющего водонапорную башню.

Влияние требований внутреннего противопожарного водопровода на выбор схемы наружного водопровода можно показать на примере. Предположим, что противопожарный водопровод можно выполнить по схеме низкого давления и объединить с производственным водопроводом, подающим неочищенную воду (не пригодную для хозяйственно-питьевых нужд) Возникает вопрос: к какому водопроводу можно присоединить внутреннюю противопожарную сеть?

В случае объединения внутренней противопожарной сети с производственной необходимо учесть влияние увеличения напора в сети на эксплуатацию наружного производственного водопровода, исходя из условия тушения пожара от внутренних пожарных кранов. Если требуемый напор для производственной водопровода невелик, а расход велик и напор для тушения через внутренние краны больше производственного напора, то объединять внутренний противопожарный водопровод с производственным нецелесообразно.

9.4 Спринклерное и дренчерное оборудование

Спринклерное оборудование предназначено для автоматической подачи сигнала о пожаре и его тушения. Оборудование состоит из труб, проложенных внутри помещения под потолком. На трубах установлены спринклеры, которые автоматически открываются при повышении температуры в помещении до заданного предела и подают в очаг горения воду в виде капельных водяных струй Спринклерная система постоянно находится под давлением воды, чтобы обеспечить ее подачу к месту пожара при открывании замка спринклера. Водоисточником спринклерного оборудования служит хозяйственно-противопожарный, производственно-противопожарный и другие водопроводы, а также естественные водоисточники и искусственные водоемы.

В зависимости от вида водоисточника выбирают тип водопитателя. Обычно спринклерное оборудование имеет два водопитателя: вспомогательный (автоматический) и основной. Автоматический водопитатель (водонапорный бак, гидропневматическая установка, водопровод) подает воду и установку до момента включения в работу основного водопитателя. В качестве основного водопитателя используют насосно-силовое оборудование, водопроводы и запасные емкости. Трубопроводы спринклерного оборудования в режиме ожидания заполняют водой или воздухом в зависимости от температуры воздуха в помещении. Распределительные сети спринклерного оборудования подразделяются на самостоятельные секции (обычно секция защищает помещение или этаж здания) с тупиковой или кольцевой разводкой трубопроводов. Капельные водяные струи образуются при выходе воды из спринклера при напоре не менее 5 м.

Дренчерное оборудование предназначено для автоматического или ручного тушения пожара в помещениях путем орошения капельными водяными струями на расчетной площади здания. Дренчерное оборудование используют также для создания водяных завес в проемах дверей или окон, орошения отдельных элементов технологического оборудования и т. п. Такое оборудование применяют для пожароопасных объектов, где возможно быстрое распространение огня. При горении легковоспламеняющихся веществ и жидкостей дренчерное оборудование локализует пожар (сдерживает развитие очага пожара), позволяет пожарным приблизиться к очагу горения и предотвращает возможность распространения огня на соседние объекты. Устройство дренчерного оборудования схоже со спринклерным, только вместо спринклеров на распределительной сети установлены дренчеры (спринклеры без легкоплавкого замка) и автоматическое включение подачи воды осуществляется по команде пожарного извещателя, реагирующего на один из факторов, сопутствующих пожару (теплота, дым, пламя).

Стационарные установки локального действия используют для тушения загораний на отдельных участках технологических установок особо высокой пожарной опасности, когда применение спринклерно-дренчерного оборудования неэффективно. Эффект тушения в данном случае достигается мгновенной подачей большого количества воды в очаг пожара за короткий промежу-

ток времени. Тушение пламени твердых горючих материалов и жидкостей в данном случае достигается в результате подачи распыленных или туманообразных водяных струй. Для образования таких струй используют специальные оросители, в которые вода подается под высоким давлением (до 1 МПа).

Установки водопенного пожаротушения применяют для тушения пламени легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Наибольшее распространение эти установки получили в системах противопожарной защиты химической, нефтехимической и других отраслях промышленности, где добывают и перерабатывают нефть и природный газ. Огнетушащим средством в таких установках является пена, которая получается из 4—6%-ного водного раствора пенообразователей. Пенные установки имеют спринклерное или дренчерное исполнение. По своему устройству они аналогичны стационарным установкам водяного пожаротушения. Отличие состоит в том, что спринклеры заменены оросителями пены, а дренчеры — генераторами пены. Кроме того, водопитатели пенных установок дополнительно оборудуют дозаторами для введения требуемого количества пенообразователя в поток воды.

9.5 Установки лафетных стволов

Лафетные установки применяют для подачи и управления водяными или пенными струями большой мощности. Для этой цели пожарные лафетные стволы большой производительности (до 100 л/с) устанавливают на специальных вышках, кровле зданий или площадках и подключают к специальному противопожарному водопроводу высокого давления.

Лафетные установки предназначены для тушения пожаров в складах лесо-, пиломатериалов, на технологическом оборудовании большой высоты (например, ректификационных и вакуумных колоннах нефтеперерабатывающих заводов), а также складах со сжиженным горючим газом. Для оперативной работы лафетного ствола предусматривается быстродействующая арматура включения и выключения подачи жидкости из водопровода.

Лафетные установки бывают с ручным и автоматизированным приводом. Приведенные выше схемы определяют лишь состав и взаимное расположение элементов системы водоснабжения. Размеры отдельных сооружений и установок, число и мощность насосов, вместимость резервуаров, высоту и вместимость водонапорных башен, диаметры труб рассчитывают в зависимости от расхода подаваемой воды и намеченного для них прогнозом режима работы.

Основным фактором, определяющим параметры работы элементов системы водоснабжения, является режим расходования воды потребителями, которых эта система обслуживает. В отличие от многих инженерных систем, рассчитываемых но заранее известным и заданным нагрузкам, системы водоснабжения должны учитывать непрерывно меняющийся режим водообеспечения, поэтому при проектировании систем водоснабжения необходимо точное прогнозирование водопотребления.

Для промышленных предприятий расходы воды на производственные нужды задают в соответствии с технологическим регламентом потребления воды. Сложнее прогнозировать водопотребление в населенных пунктах, так как расходование воды населением определяется рядом факторов, связанных с укладом жизни и трудовой деятельностью людей.

10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Надежная работа многофункциональных систем водоснабжения является важным условием бесперебойного водообеспечения пожарной техники и снижения ущербов от пожаров.

Многофункциональная система водоснабжения с точки зрения выбора номенклатуры показателей и оценки надежности является сложной технической системой. Эта система представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов, обеспечивающих выполнение заданных функций несколькими различными способами, отличающимися уровнями качества функционирования системы. Такими элементами в многофункциональной системе водоснабжения являются: водисточник; станция водоочистки, насосные, подающие воду в водопроводную сеть, резервуары для хранения и регулирования подачи воды; водоводы и водопроводная сеть. Возможно и дальнейшее членение системы на детали, узлы, агрегаты, приборы и т. п. Однако приведенные деления системы на элементы в зависимости от способа выполнения заданной требованиями задачи в полной мере определяют состав элементов, одновременно выполняющих поставленную цель.

В результате отказов элементов системы ухудшается характеристика качества функционирования и соответственно снижается выходной эффект (полезный результат) системы, поэтому задачи надежности сводятся к выявлению влияния отказов элементов на качество функционирования и выходной эффект системы водоснабжения.

10.1 Показатели оценки надежности системы водоснабжения

Надежность системы водоснабжения характеризуется безотказностью — сохранением непрерывного состояния работоспособности в определенных условиях водообеспечения потребителей, ремонтпригодностью — приспособленностью системы водоснабжения к предупреждению, обнаружению и устранению неисправностей и отказов; долговечностью — продолжительностью сохранения состояния работоспособности с возможными перерывами на ремонт.

Рассчитать надежность противопожарного водоснабжения — это значит определить количественные показатели, характеризующие уровень качества бесперебойного водоснабжения потребителя системой. Для оценки надежности используют следующие показатели:

- вероятность безотказной работы (безотказного водоснабжения) за время t - R_t ,
- интенсивность отказов λ ,
- интенсивность восстановления μ (показатель не учтен ГОСТом),
- наработку на отказ T (средняя продолжительность безотказного водоснабжения),
- среднюю продолжительность восстановления τ_v ,
- параметр потока отказов ω ,

а также коэффициенты готовности K_g , простоя K_n (показатель не учтен ГОСТом), технического использования K_u , неисправности $p = \lambda/\mu$ (показатель не учтен ГОСТом) и некоторые другие.

Таким образом, показатели надежности различны: одни из них характеризуют состояние системы в определенный момент времени (вероятности безотказной работы), другие — в интервале времени (среднее число отказов за ресурс), одни — размерные (наработка на отказ), другие — безразмерные (коэффициент готовности).

Задачи надежности в зависимости от поставленных целей бывают двух типов. Первый тип задач — определение количественных характеристик надежности на основе технических показателей элементов систем и функциональных связей между ними, а также требований потребителей к качеству бесперебойного водообеспечения. Задачи этого типа ставят при оценке надежности на различных этапах проектирования, при сравнительной оценке вариантов систем или проверке обеспечения требуемого уровня надежности.

Второй тип задач представляет собой анализ надежности, который проводят для установления количественных показателей, оценивающих влияние отдельных факторов на комплексный показатель надежности системы. Исходные данные для расчета включают помимо данных, используемых в решении задач первого типа данные о приоритете водообеспечения отдельных объектов и показатели ущерба из-за ненадежности системы. В результате решения этой задачи возможна проверка обеспечения требуемого уровня надежности или обоснование его экономической целе-

сообразности, а также выявление возможности оптимизации системы с учетом ее развития или изменения уровня бесперебойного водообеспечения.

Надежность системы определяют не только показатели надежности входящих в нее элементов и схема их соединения, но и наличие резерва функционирования. Важным вопросом при решении задач надежности является правильность деления системы на элементы с точки зрения ответственности тем функциям, которые они должны выполнять. Надежность системы водоснабжения определяется надежностью входящих в нее элементов, схемой их соединения, наличием резервных элементов, качеством строительства и эксплуатации системы. Применение высококачественных материалов и оборудования, качественное строительство и соответствие характеристик построенных сооружений характеристикам проектной документации обеспечивают надежность на стадии строительства.

В процессе эксплуатации надежность достигается своевременным текущим контролем за работой системы, правильным уходом за оборудованием, своевременным обнаружением, ликвидацией неисправностей и т. д. Для этого используют оптимальные методы технического обслуживания и ремонта, разработанные на основе анализа и обработки данных о надежности изделий по результатам эксплуатации. В процессе эксплуатации выявляют также ошибки и просчеты, допущенные во время проектирования и реализации проекта.

При проектировании систем необходимо проверять показатели надежности, для определения которых важно сформулировать требования, выбрать параметры и установить нормы заданного уровня качества бесперебойного водообеспечения. Работоспособность — состояние системы, при котором она способна обеспечивать заданный уровень качества бесперебойного водоснабжения потребителей, установленный требованиями или критическими условиями водообеспечения расчетных моделей.

Требования СНиП не устанавливают показателей надежности и не используют понятия и характеристики (выходные параметры) систем, дающие возможность перейти на показатели надежности. В то же время косвенными характеристиками для определения показателей надежного водообеспечения потребителей служат: нормы водообеспечения, суммарная производительность водопитателя, требования к бесперебойности подачи воды по водоводам и водопроводным сетям, требования к дублированию источников энергоснабжения насосных агрегатов, резервирование элементов сооружений, срок службы системы и т. п.

Говоря о «надежности противопожарного водообеспечения», имеют в виду не какую-то абстрактную надежность, а надежность водоснабжения потребителей во время пожара. В результате можно дать следующее определение надежности системы водоснабжения, представляющей собой комплекс водопроводных сооружений — это способность (вероятность) обеспечения бесперебойной подачи требуемого количества воды потребителю (близкого к оптимальному) с заданным напором в течение заданного срока службы. Надежность следует понимать в двух аспектах: качественном — свойство системы, включающей сооружения и потребителей (характер водообеспечения), и количественном — мера суждения об определенном состоянии системы водоснабжения (характеристика этой меры — показатель надежности).

Под «заданными функциями» в общем случае понимают регламентированные требования потребителей к бесперебойности водообеспечения. Когда эти функции выполняются системой по отношению к конкретному потребителю i , считается, что система находится в работоспособном состоянии (состоянии работы) по отношению к i . Следует отметить, что службы эксплуатации не осуществляют строгого контроля за соблюдением норм отбора воды для тушения пожаров, на которые рассчитана система. В результате чрезмерного отбора воды на противопожарные нужды отмечаются нарушения водоснабжения других потребителей или разрушение водопроводных труб из-за недопустимого повышения давления при гидравлических ударах, возникающих в результате повышенной водоотдачи водопроводной сети во время работы пожарных автонасосов. Таким образом, система в одном и том же состоянии может быть работоспособной по отношению к потребителю i и неработоспособной по отношению к потребителю j (состояние отказа по отношению к потребителю j). Недостаточная надежность системы в этом случае приводит к ухудшению или нарушению нормального хозяйственно-питьевого водообеспечения, необходимого для естествен-

ного потребления воды и создания комфортных условий для населения. При рассмотрении вопросов надежности важным является понятие «состояние отказа», определяющего уровень качества бесперебойного водообеспечения и выход его за допустимый предел.

10.2 Отказы систем водоснабжения

Состояние отказа характеризует частичную или полную утрату качества функционирования. Система водоснабжения может находиться в состоянии полного или частичного отказа. Отказ — событие, при котором технологические показатели работы системы водоснабжения выходят за пределы сформулированного понятия работоспособности. Полный отказ — отказ, в результате которого система становится неспособной выполнять заданные функции. Частичный отказ — отказ элементов системы, после которого система еще способна выполнять заданные функции.

К отказам относятся недопустимые отклонения параметров от требуемых значений водообеспечения, временные нарушения водообеспечения системой или выход системы из строя с полным прекращением подачи воды. Требуемое водообеспечение в данном случае представляет собой значение, минимизирующее приведенные капиталовложения, издержки эксплуатации и затраты на возмещение последствий от пожаров, вызванных нарушением бесперебойного водообеспечения за нормативный (заданный) срок службы системы. Видимо, оптимальному значению водообеспечения отвечает определенная вероятность или допустимый риск. Состояние отказа для систем водоснабжения может быть сформулировано как:

- любой кратковременный перерыв в подаче воды для тушения пожара; нарушение режима водообеспечения, заданного нормами расхода и напора воды, подаваемой для противопожарных нужд;

- перерыв в водоснабжении хотя бы одного потребителя;

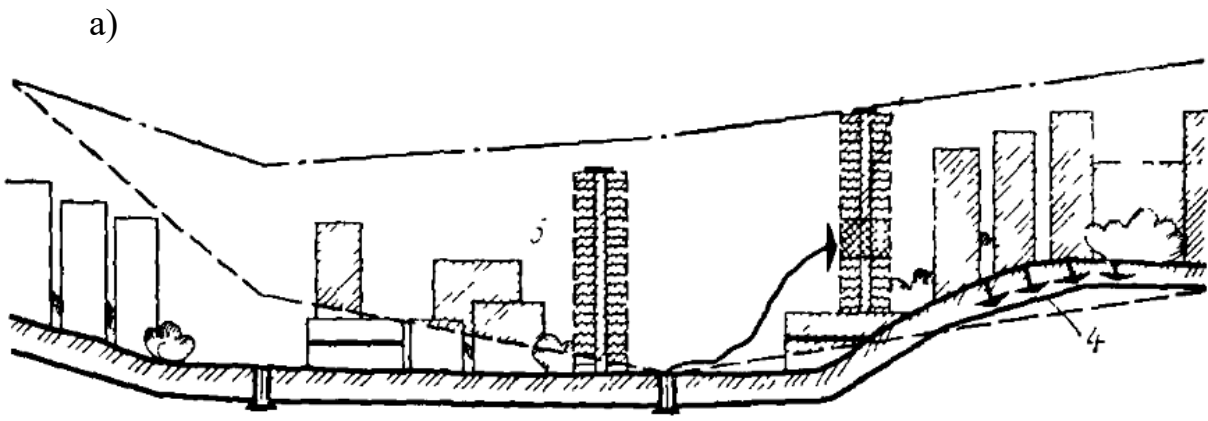
- перерыв в водоснабжении части потребителей;

- полное прекращение водоснабжения потребителей;

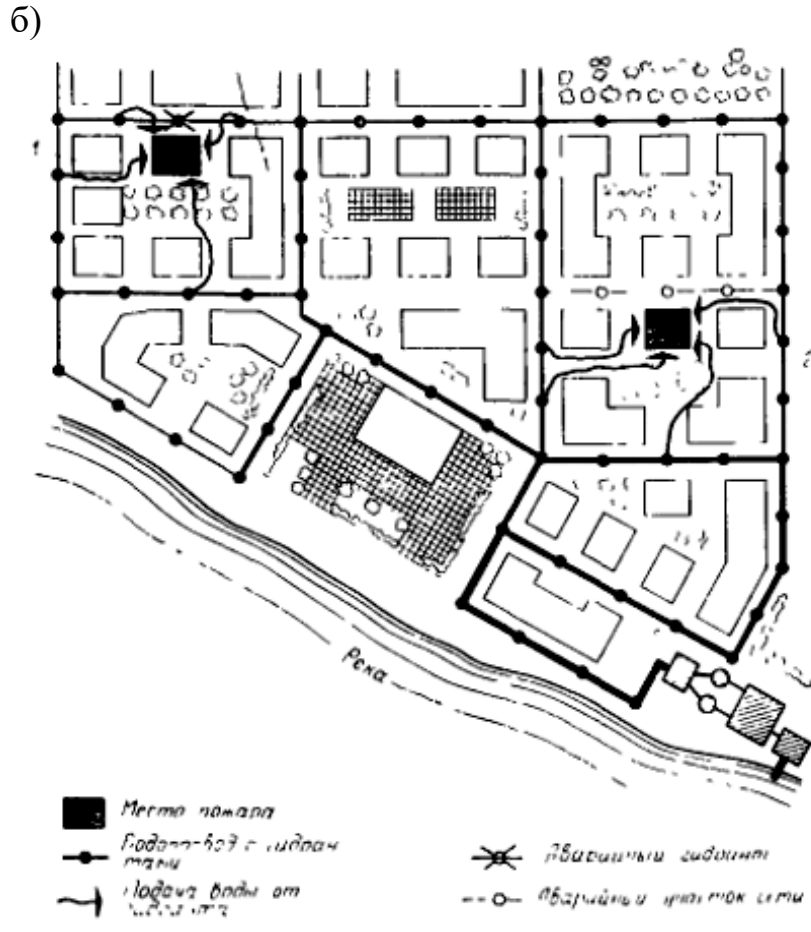
- перерыв в водоснабжении на время, превышающее регламентированное для данной группы потребителей, и др.

В коммунальных системах водоснабжения отказы некоторых элементов не приводят к потере работоспособности системы в целом, но иногда являются заранее «запланированным» событием (профилактический плановый ремонт участков водопроводной сети; замена насосно-силового оборудования после установленного срока службы и т. п.).

Таким образом, за меру надежности системы принимается вероятность случайного события, в результате которого за установленный срок эксплуатации не произойдет ни одного отказа. Отказы, вызывающие нарушение заданного режима водообеспечения при тушении пожаров (например, отказ пожарного гидранта, разрушение участка водопроводной сети и др.), могут произойти не только в результате аварий и повреждений отдельных элементов самой системы («внутренние» отказы водоснабжения — рис. 10.1, а), но и в результате воздействия внешних факторов («внешние» отказы водоснабжения — рис. 10.1, б).



- Пьезометрическая линия напор в ров при нормальном водопотреблении
- Пьезометрическая линия напор в ров при отборе воды на пожарные нужды
- ▨ Здания с нарушенным водопотреблением
- ▨ Место пожара
- Подача воды от гидранта
- ⇓ Место инфильтрации



- Место пожара
- Гидрант-борт с гидрант твэри
- Подача воды от гидрант твэри
- ✗ Абвэришны гидрант
- Абвэришны прэжэток сетэ

Рисунок 10.1 – Схема отказов водопроводной сети

а — «внутренний» отказ; б — «внешний» отказ,

1 — нарушение подачи воды при выходе из строя пожарного гидранта,

2 — нарушение водоснабжения при аварии участка сети,

3 — нарушение водообеспечения жителей города из-за снижения напора при чрезмерном отборе воды для тушения пожаров,

4 — нарушение санитарно-гигиенических условий водоснабжения (образование инфильтрации, вызванной разрезением в сети) в результате отбора воды при тушении пожаров

За отказ системы водоснабжения на стадии ее расчета и проектирования понимается состояние, которое не может отвечать заданным требованиям, формализуемым с помощью критических условий водообеспечения на основе расчетных моделей. Вероятность отказа в этом случае является вероятностью выхода (выброса) за некоторый допустимый уровень. В системе водоснабжения, работающей в режиме пожаротушения, появление независимого события (отказа) характеризует вероятность того, что фактические параметры водопотребления превышают расчетные, определяемые требованиями нормативов. К этим параметрам относятся: расход воды для тушения пожара, продолжительность отбора в процессе тушения, продолжительность восстановления израсходованного при пожаре неприкосновенного запаса воды, одновременное число отборов при пожаре, график неравномерности водоотбора потребителей.

При рассмотрении сложного вероятностного процесса отбора воды для тушения пожаров важно установить оптимальную норму водообеспечения потребителя или отвечающий ей размер риска ε . Значение ε изменяется в пределах доверительного интервала, тем большего, чем менее точен прогноз капитальных затрат, издержек эксплуатации и возмещения ущерба от пожаров. Кроме того, значение ε меняется со временем. Состояние, характеризующее нарушение расчетной водообеспечения конкретного потребителя, может быть представлено следующим образом. Пусть система водоснабжения обеспечивает потребителей водой в соответствии с заданными графиками режима потребления воды по часам суток, дням недели и сезонам года и находится в N различных состояниях. Множество состояний N разобьем на два подмножества. Подмножество N_{Ri} — совокупность состояний, в которых потребитель i имеет связь хотя бы с одним источником системы (система связана в данном состоянии), а подмножество N_{Qi} — совокупность состояний, в которой таких связей нет (система не связана). Состоянию системы в точке i соответствует определенная водоотдача $\Phi(q_{ij})$, характеризующая в данной точке качество бесперебойного водообеспечения, которое зависит от пропускной способности элементов изменения напора воды в водопроводной сети и подачи водоисточника в данном состоянии. В некоторых случаях на качество бесперебойного водообеспечения значительно влияет процесс водопотребления более ответственными потребителями системы, чем потребитель i .

В общем случае характеристика качества бесперебойного водообеспечения имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Phi(q_{ij}) &= 0 && \text{для } j \in N_{Qi}; \\ \Phi(q_j) &\leq q_i(\tau) && \text{для } j \in N_{Ri}, \end{aligned}$$

где $q_i(\tau)$ — водопотребление в точке i в момент τ .

10.3 Влияние случайных факторов на надежность систем водоснабжения

Система водоснабжения подвержена влиянию случайных факторов, которые необходимо прогнозировать. Для расчета параметров системы необходимо знать возможные источники случайных воздействий, а также их количественные характеристики. Случайные воздействия внешней среды (климата, времени года, метеорологических условий и т. д.), отклонения от нормального режима водопотребления внутри самой системы (включение непредвиденного количества пожарной техники, обусловленное ростом уровня пожарной опасности объектов; чрезмерное потребление воды на хозяйственно-питьевые нужды в результате улучшения уровня санитарно-технического обеспечения и др.) бывают настолько значительными, что могут привести к существенному изменению параметров работы системы. Поэтому оценке влияния указанных факторов необходимо уделять серьезное внимание при проектировании новых и реконструкции существующих систем.

Несмотря на это, влияние случайных факторов далеко не всегда учитывается, и фактические условия работы системы часто существенно отличаются от условий, на которые она была рассчитана при проектировании. Например, режим водопотребления при тушении пожаров зависит от большого числа причин, которые трудно учесть и фактические расходы воды могут существенно превысить нормативные. Следует также отметить, что потребление воды для тушения пожаров

увеличивается из года в год. Наряду с этим модернизируется техника для отбора воды на противопожарные нужды и увеличивается производительность пожарных автонасосов. В то же время не исключено, что параметры работы системы водоснабжения, определяющие характеристики ее функционирования в течение определенного срока службы, будут ниже характеристик функционирования новой пожарной техники. Это приведет к спаду функционирования системы водоснабжения.

Определение влияния отказов на качество бесперебойного водообеспечения является предметом исследования надежности систем водоснабжения. При разработке критериев и норм надежности водообеспечения и выборе номенклатуры соответствующих параметров необходимо учитывать конструкции водопроводных сооружений системы на стадии проектирования, а также прогнозы развития пожарной техники. Вероятность нормального функционирования системы водоснабжения зависит не только от правильного определения продолжительности отбора воды, но и от расчета продолжительности восстановления израсходованного количества воды при пожаре. Для определения уровня качества работы системы необходимо иметь математическую модель для определения характеристик состояний системы в зависимости от ее параметров.

10.4 Пути обеспечения надежности системы водоснабжения

Обеспечение надежности системы водоснабжения, как и других систем массового обслуживания, является одной из основных задач при их проектировании. Система должна быть запроектирована и построена так, чтобы в процессе эксплуатации она выполняла свои функции с заданной степенью бесперебойности. Поскольку функцией систем водоснабжения является подача потребителям воды в соответствии с заданным режимом потребления, то выполнению этих условий отвечает работоспособное состояние системы. Если в результате каких-либо причин снижается качество водообеспечения объекта ниже допустимого предела, то имеет место «отказ» системы. Надежность систем подачи воды достигается структурным резервированием отдельных элементов системы, т. е. параллельным включением нескольких взаимозаменяемых элементов или путем «временного» резервирования.

Структурное резервирование. Примером нерезервированной системы подачи воды является водопровод из нескольких n последовательно включенных элементов (рис. 10.2, а). Его работоспособное состояние обеспечивается только при исправности всех элементов; отказ любого элемента вызывает полный отказ всей системы.

Нерезервированной являются две линии, включенные параллельно между точкой подачи А и точкой отбора Б (см. рис 10.2, б) при условии, что для бесперебойной подачи воды необходима одновременная работа обеих линий. Предположим, что отказу системы отвечает снижение подачи воды более чем до 70%. По тракту 1 может быть подано 60%, по тракту 2 — 40% (или 50%) требуемого расхода воды. Подобная система не является резервированной, так как авария любого тракта приводит к снижению подачи более допустимого предела.

Надежность такой системы уменьшается с увеличением числа элементов и всегда меньше надежности каждого ее элемента.

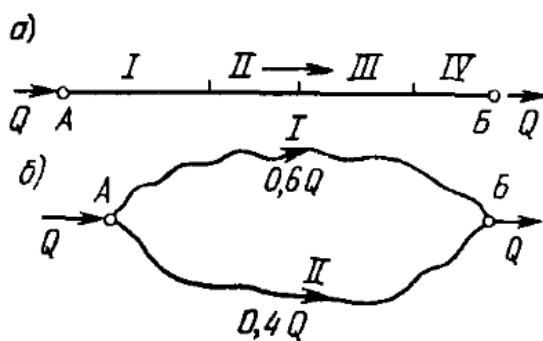


Рисунок 10.2 – Схема водовода
 а – последовательное включение элементов,
 б – параллельное включение элементов

Резервированные системы представляют собой m элементов, из которых только n элементов предназначены для обеспечения нормального функционирования системы. Надежность этой системы возрастает с увеличением «кратности резервирования» $k=m/n$, где m — число резервных элементов; n — число основных элементов.

Увеличение надежности водоводов достигают при устройстве соединительных перемычек.

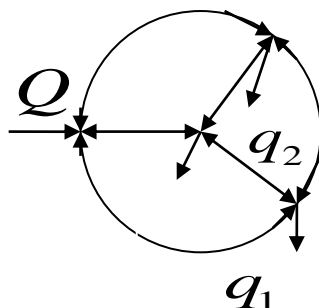


Рисунок 10.3 – Кольцевая водопроводная сеть

Кольцевая водопроводная сеть является резервированной системой. Большинство точек отбора воды соединено с точками питания сети многими возможными путями, поэтому аварии отдельных участков сети не нарушают существенно процесса водообеспечения.

Следует отметить, что увеличение роста водопотребления населенных пунктов по сравнению с прогнозом водообеспечения вызывает необходимость развития системы водоснабжения путем реконструкции и модернизации водопроводных сооружений за счет увеличения числа водоводов, прокладки дополнительных магистралей сети, замены агрегатов на насосных станциях и установок на очистных сооружениях более мощными, а иногда строительства более совершенных источников и водозаборов.

Временное резервирование. Вторым способом увеличения надежности является использование резервных и аккумулирующих емкостей для хранения запасов воды в период ремонта отказавших элементов. Наиболее распространенным методом временного резервирования является устройство запасного резервуара в конечной точке водовода. Вместимость резервуара в этом случае должна быть достаточной для снабжения объекта на время ликвидации аварии водовода. В ряде случаев при резервуаре устраивают для этой цели насосную станцию.

11. ЭКСПЕРТИЗА ПРОЕКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБСЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

11.1 Проведение экспертизы проектных материалов

При проведении экспертизы проектов строительства следует руководствоваться законодательными и нормативными актами Российской Федерации, рекомендациями по проведению экспертизы технико-экономических обоснований (проектов) на строительство объектов жилищно-гражданского назначения, а также другими документами, регулирующими инвестиционную деятельность.

Для внутреннего водопровода и канализации:

1) Проверяется полнота исходных данных, в том числе:

- наличие технических условий на подключение к внешним коммуникациям и источникам;
- характеристика района и участка строительства;
- материалов по инженерно-геологическим изысканиям на площадке строительства. При этом обращается особое внимание на наличие природоопасных и климатических условий (сейсмичность, просадочность, вечная мерзлота, оползни, карсты и др.);
- сведений о состоянии существующих сетей и сооружений водоснабжения и водоотведения с указанием их характеристик.

2) Оценивается качество и эффективность принятых решений, при этом проверяются:

- соответствие проектных решений техническим условиям;
- правильность принятых норм, объемов потребляемой воды питьевого качества, объемов сточных вод, баланс водопотребления и водоотведения;
- надежность подачи воды потребителям требуемого качества и количества, расходы воды, в том числе на пожаротушение, требуемые напоры по системам водоснабжения, пропуск расчетных расходов воды при различных режимах работы систем;
- эффективность принятых систем внутреннего водопровода;
- рациональность принятых решений по трассировке в общих траншеях сетей водопровода и канализации в микрорайоне;
- гидравлические условия совместной работы повысительных насосов и сети;
- насосное оборудование, установки для охлаждения воды, диаметры и материал труб;
- требования к качеству воды в системах оборотного водоснабжения;
- наличие в составе проекта основных технологических схем водоснабжения, в том числе оборотного или рециркуляционного, их качество;
- наличие в составе проекта гидравлических расчетов систем автоматического пожаротушения, обосновывающих правильность подбора оборудования для данной системы, их качество;
- эффективность принятых систем водоотведения, пропускная способность сетей, диаметры и материал труб;
- спецификация материалов и оборудования;
- мероприятия по системам водоснабжения и канализации в особых климатических и природных условиях.

Экспертная оценка формируется с учетом:

- соответствия проектных решений техническим условиям на подключение к сетям и источникам, нормативным документам, а также заданию на проектирование;
- замечаний и предложений по повышению экономической эффективности, эксплуатационной надежности и безопасности за счет совершенствования технических решений, в том числе: уменьшения расхода потребляемой воды и сброса стоков и экономии строительных материалов.

11.2 Проведение обследования систем противопожарного водоснабжения

Статистический анализ пожаров свидетельствует о том, что количество пожаров в жилых и общественных зданиях не снижается, а число погибших и получивших травмы людей на пожарах возрастает. Данное обстоятельство представляет серьезную проблему и обязывает органы Госу-

дарственной противопожарной службы МЧС России и владельцев жилых и общественных зданий принять все меры по обеспечению безопасности людей на случай возникновения пожара.

В настоящее время большое количество помещений, подвальных и цокольных этажей жилых и общественных зданий арендуется различными организациями и используется для производственных, административных, торговых и других целей. Нередко в процессе эксплуатации изменяется функциональное назначение помещений, происходит их реконструкция и перепланировка, используются или хранятся горючие материалы и жидкости, что существенно повышается пожарную опасность зданий.

Особую опасную опасность представляют помещения подвальных и цокольных этажей, в которые возможно попадание природного горючего газа из газопроводов или биологического газа через неплотности строительных конструкций, коммуникационные траншеи, туннели и др.

Контроль за выполнением правил пожарной безопасности осуществляется Государственным инспектором по пожарному надзору ГПС МЧС России, специально уполномоченными должностными лицами предприятий, организаций, учреждений, работниками пожарной ведомственной пожарной охраны не реже одного раза в два года. Сроки обследований регламентированы приказами МЧС России.

Методика контроля включает три основных этапа: подготовку, проверку и оформление результатов проверки.

Обследования и проверки проводятся с участием руководителей объектов (предприятий) или выделенных ими представителей.

По результатам обследований и проверок Государственным инспектором в установленном порядке составляется Предписание, а должностным лицом предприятия – Акт.

Основные противопожарные требования к устройству и эксплуатации систем противопожарного водоснабжения приведены в нормативных документах: ППБ 01-03, СНИП 2.04.02-84*, СНИП 2.08.02-89* и др.

Блок-схема проверки систем противопожарного водоснабжения

1	Допустимость выполнения объединенного наружного противопожарного водопровода	СНИП 2.04.02-84* п.2.11
2	Наличие кольцевого или допустимость выполнения тупикового водопровода	СНИП 2.04.02-84* п. 8.5; СНИП 2.08.02-89* п. 7 прил. 8
3	Наличие двух и более вводов водопитателя	СНИП 2.04.01-85* п. 9.1-9.3; СНИП 2.08.02-89* п. 7 прил. 8
4	Соответствие принятого расхода воды на наружное пожаротушение	СНИП 2.04.02-84* п. 2.12, 2.13 табл. 6, 2.15-2.17, 2.20-2.23
5	Соответствие суммарного расхода воды на тушение в здания с учетом спринклерных или дренчерных установок, внутренних пожарных кранов и наружных гидрантов	ППБ 01-03 п. 89; СНИП 2.04.02-84* п. 2.13, 2.18, 2.19
6	Соответствие минимальных и максимальных напоров в сети наружного противопожарного водопровода	СНИП 2.04.02-84* п. 2.26, 2.29
7	Правильность выполнения наружных трубопроводов	СНИП 2.04.02-84* п. 7.9, 7.13, 7.14, 8.46; СНИП 2.04.01-85* п. 11.27
8	Наличие и правильность выполнения стояков-сухотрубов для подключения передвижной пожарной техники	СНИП 2.04.02-84* п. 2.16; СНИП 2.04.01-85* п. 6.15
9	Допустимость и правильность выполнения пожарных резервуаров или водоемов: - наличие пожарного и аварийного объема воды; - наличие и исправность систем контроля и блоки-	ППБ 01-03 п. 89, 90, 94,95; СНИП 2.04.02-84* п. 2.11, 2.24, 2.25, 9.1, 9.5-9.11, 9.27-9.33;

	<p>ровки за объемами воды;</p> <ul style="list-style-type: none"> - расстояние между резервуарами и от резервуаров до зданий; <p>Наличие подъездов, дорог и указателей водоисточников</p>	СНиП 2.08.02-89* п. 20 прил. 8
10	Правильность размещения пожарных гидрантов от стен зданий и края проезжей части	СНиП 2.04.02-84* п. 8.16
11	Расстановка гидрантов на водопроводной сети с учетом расхода воды на наружное пожаротушение	СНиП 2.04.02-84* п. 8.16, 9.30
12	Возможность устройства пожарных гидрантов на сети производственного водопровода	СНиП 2.04.02-84* п. 2.21
13	Наличие указателей пожарных гидрантов	ППБ 01-03 п. 90
14	Необходимость устройства и наличие в здании внутреннего противопожарного водопровода	СНиП 2.04.01-85* п. 6.1 табл. 1, 6.5; СНиП 2.08.02-89* п. 1, 2 прил. 8
15	Наличие кольцевого или допустимость выполнения тупикового внутреннего противопожарного водопровода:	СНиП 2.04.01-85* п. 6.11, 9.1, 9.2; СНиП 2.08.02-89* п. 7 прил. 8
16	Соответствие принятого расхода воды на внутреннее пожаротушение: <ul style="list-style-type: none"> - с учетом числа струй на орошение каждой точки помещения; - с учетом высоты компактной части струи и диаметра spryska; - в зависимости от высоты и объема общественного здания 	СНиП 2.04.01-85* п. 6.1 табл. 1, 6.2-6.4; СНиП 2.08.02-89* п. 3, 6 прил. 8
17	Соответствие минимального и максимального напоров у пожарных кранов	СНиП 2.04.01-85* п. 6.1 табл. 3, 6.7, 6.8; СНиП 2.08.02-89* п. 8 прил. 8
18	Правильность выбора диаметра и длины пожарных рукавов	СНиП 2.04.01-85* п. 6.8, 6.14; СНиП 2.08.02-89* п. 4 прил. 8
19	Соответствие числа пожарных стояков и пожарных кранов	СНиП 2.04.01-85* п. 6.12; СНиП 2.08.02-89* п. 4-6 прил. 8
20	Правильность размещения пожарных кранов	ППБ 01-03 п. 9.1; СНиП 2.04.01-85* п. 6.13, 6.14, 6.16, 6.17; СНиП 2.08.02-89* п. 4 прил. 8
21	Допустимость выполнения спаренных пожарных кранов	СНиП 2.04.01-85* п. 6.12
22	Комплектность и правильность выполнения пожарных шкафов: <ul style="list-style-type: none"> - наличие и исправность клапана (задвижки), пожарного рукава, пожарного ствола и двух огнетушителей; - наличие и исправность кнопок пуска насосов-повысителей и систем противодымной защиты; - наличие отверстий (щелей) для вентиляции; - наличие прозрачной дверки или вставки для визуального контроля комплектности пожарного шкафа; - наличие надписей (обозначений) и пломбы 	ППБ 01-03 п. 91; СНиП 2.04.01-85* п. 6.13, 6.14

23	Правильность размещения пожарных насосов	СНиП 2.04.02-84* п. 7.10, 7.23; СНиП 2.08.02-89* п. 17 прил. 8
24	Правильность выбора типа, количества рабочих и резервных пожарных насосов	СНиП 2.04.02-84* п. 7.2, 7.3; СНиП 2.08.02-89* п. 16 прил. 8
25	Наличие не менее двух всасывающих и двух напорных линий противопожарного водопровода	СНиП 2.04.02-84* п. 7.5, 7.6; СНиП 2.08.02-89* п. 7 прил. 8
26	Наличие у каждого пожарного насоса обратного клапана, двух задвижек и двух манометров	СНиП 2.04.02-84* п. 7.7, 7.8; СНиП 2.04.01-85* п. 12.16
27	Наличие систем автоматического, дистанционного и ручного пуска пожарных насосов	СНиП 2.04.01-85* п. 12.12, 12.15, 12.24; СНиП 2.04.02-84* п. 13.18, 13.20, 13.21; СНиП 2.08.02-89* п. 16 прил. 8
28	Соответствие категории надежности насосных станций	СНиП 2.04.01-85* п. 4.4, 7.1
29	Соответствие категории надежности энергоснабжения пожарных насосных станций	СНиП 2.04.01-85* п. 12.23
30	Правильность выполнения насосных станций: - размещения станций в здании; - наличие общей схемы пожарного водоснабжения здания и схемы обвязки насосов; - наличие основного и резервного освещения, вентиляции и телефонной связи; - наличие инструкции о порядке включения насосов-повысителей; - наличие первичных средств пожаротушения и указателей	ППБ 01-03 п. 92; СНиП 2.04.01-85* п. 12.24; СНиП 2.04.02-84* п. 13.13, 13.21; СНиП 2.08.02-89* п. 17 прил. 8

Автоматические системы противопожарной защиты в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004-91* должны обеспечивать требуемый уровень пожарной безопасности людей и материальных ценностей, а также экономическую эффективность этих систем при защите материальных ценностей.

В зависимости от требуемого уровня пожарной безопасности автоматические установки пожаротушения должны выполнять одну или несколько задач:

- обеспечивать безопасность людей и сохранность материальных ценностей;
- предотвращать необратимые воздействия на строительные конструкции и распространение пожара на другие части здания (помещения) и объекты.

Требования к конструктивному исполнению, монтажу и эксплуатации автоматических установок пожаротушения регламентированы:

ППБ 01-03, ГОСТ 12.1.004-91*, НПБ 110-03, ГОСТ 12.4.026-76, ГОСТ 12.3.046-91, ГОСТ 15150-69, ГОСТ 50680-94, ГОСТ 50800-95, ГОСТ 50969-96, ГОСТ 51091-97.

Блок-схема проверки автоматических установок пожаротушения

Необходимость устройства и наличие установок пожаротушения: НПБ 110-03 п. 1, 3, 4, 6, таблицы 1-3; ГОСТ 12.1.004-91* п. 1.2; СНИП 2.08.02-89* п. 1, 2 приложения 8
Наличие на объекте следующей технической документации: - проектные материалы на установки пожаротушения; - инструкция о порядке действий дежурного персонала при срабатывании установок пожаротушения; - акт приемки в эксплуатацию или протокол последнего испытания установок пожаротушения и др.: ППБ 01-03 п. 97, 101; ГОСТ 12.1.004-91* п. 1.4, 1.5
Исправность и соответствие установок проектной документации: ППБ 01-03 п. 98; НПБ 110-03 п. 1, 7, 11
Выбор вида огнетушащего вещества: НПБ 88-01 п. 4.9, 4.10, 6.4, 7.6, 7.7, 7.25, 8.1, 9.1-9.8
Выбор способа тушения: НПБ 88-01 п. 4.4, 5.1, 5.2, 5.5, 6.1, 7.1-7.3, 7.23, 8.3, 8.14, 8.15, 9.1; НПБ 110-03 п. 3 таблицы 1-3
Правильность выбора вида установки пожаротушения и ее конструктивное исполнение: НПБ 110-03 п. 1, 3, 7, 11, 14; НПБ 88-01 п. 3.3, 4.9, 4.10, 5.2, 6.1, 6.4, 6.9, 7.1, 7.6, 7.7, 8.1, 8.4-8.7, 9.1-9.8, 10.1-10.3, приложение 1; СНИП 2.08.02-89* п. 1, 2, 9, 10 приложения 8; ГОСТ 12.3.046-91*, ГОСТ 15150-69; ГОСТ Р 50680-94; ГОСТ 50800-95; ГОСТ 50969-96; ГОСТ 51091-97
Инерционность срабатывания установки пожаротушения: НПБ 88-01 п. 5.4, 7.12.2
Задержка срабатывания и алгоритм подачи огнетушащего вещества с учетом времени эвакуации людей из помещения: НПБ 88-01 п. 4.64, 5.4, 7.12, 7.13.5, 8.33, 9.9, 9.16, 9.23, 11.1, 11.5, 11.11, 11.17, 11.22
Выбор типа насадков, оросителей или генераторов: НПБ 88-01 п. 4.16, 4.18, 5.8, 5.13, 5.14, 7.16.1, 7.16.6
Правильность расстановки насадков и равномерность распределения огнетушащего вещества по объему, площади, высоте защищаемого помещения: НПБ 88-01 п. 4.6, 4.7, 4.11-4.19, 4.24, 4.25, 4.35, 4.36, 5.5, 7.16, 8.20, 8.23, 8.25, 9.13-9.18, 10; СНИП 2.08.02-89* п. 9-11, 13, 14 приложения 8
Правильность определения расчетных параметров (интенсивности подачи, расхода, продолжительности подачи и суммарного количества огнетушащего вещества): НПБ 88-01 п. 4.2, 4.4, 4.24, 4.26, 4.55, 5.3-5.5, 5.7, 5.16, 6.8, 6.9, 7.11, 7.13, 7.24-7.27, 8.14, 8.15, 8.20, 8.23, 8.24, 9.12, 10.4, приложения 2, 3, 5; СНИП 2.08.02-89* п. 11, 15, 22 приложения 8
Наличие резерва огнетушащего вещества: ППБ 01-03 п. 99; ГОСТ 12.3.046-91* п. 14,15; НПБ 88-01 п. 4.58-4.62, 6.8, 7.11.2-7.11.4, 8.25, 8.26
Правильность выполнения трубопроводов, узлов управления и запорно-регулирующей арматуры: ППБ 01-03 п. 92, 93; НПБ 88-01 п. 4.27, 4.28, 4.32, 4.33, 4.39, 4.40, 4.43-4.49, 4.51, 4.52, 7.30, 7.31
Правильность выполнения насосных станций и станций пожаротушения: - размещение и конструктивное исполнение станций; - наличие двух вводов; - наличие двух насосов-повысителей и насосов-дозаторов и др.: ППБ 01-03 п. 92; НПБ 88-01 п. 4.70-4.76, 7.17.1-7.17.3, 11.7, 11.10, 11.16; СНИП 2.08.02-89* п. 17 приложения 8
Окраска трубопроводов и установок пожаротушения: ГОСТ 12.1.004-91* п. 1.13; ГОСТ Р 50969-96 п. 4.27, 4.28; ГОСТ 12.4.026-76
Наличие и исправность устройств подачи световых и звуковых сигналов о срабатывании установок пожаротушения: ППБ 01-03 п. 97, 102; НПБ 88-01 п. 11.1-11.9; 11.21, 11.25

<p>Обеспечение взаимодействия установок пожаротушения с инженерным и противопожарным оборудованием объекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выключение систем оповещения о пожаре и систем противодымной защиты; - отключение систем вентиляции, электроустановок, технологических аппаратов и др.: <p>ППБ 01-03 п. 98, 102; НПБ 88-01 п. 3.5, 4.5, 4.11, 11.1</p>
<p>Наличие у автоматических установок пожаротушения (кроме спринклерных) устройств дистанционного и местного пуска: НПБ 88-01 п. 2.2.7, 8.11, 8.32, 9.9, 11.11, 11.12, 11.18, 11.22, 11.23; СНиП 2.08.02-89* п. 12, 16 приложения 8</p>
<p>Наличие устройств контроля давления (уровня) или массы огнетушащего вещества: НПБ 88-01 п. 4.26, 7.13.8, 11.1, 11.3, 11.5, 11.9-11.11, 11.15, 11.16, 11.21, 11.26</p>
<p>Соответствие надежности электроснабжения, заземления и зануления установок пожаротушения и приборов: ПУЭ п. 1.2.17, 1.2.18, 7.1.45, 7.1.54, 7.2.14, 7.2.41, 7.2.59; НПБ 88-01 п. 4.49, 7.33, 11.1, 11.5, 11.9, 11.10, 11.15, 11.21, 11.26, 14.1-14.9, 15.1-15.3</p>
<p>Наличие устройств удаления огнетушащих веществ после окончания тушения пожара: НПБ 88-01 п. 4.67, 4.68, 7.22, 7.30, 7.31, 8.30, 9.24</p>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов Ю.Г., Иванов А. И. и др. Гидравлика и противопожарное водоснабжение. – М., 2003.
2. Рабинович Е.З., Евгеньев А.Е. Гидравлика. – М.:Недра, 1987. – 224с.
3. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. ППБ 01-03 – М., 2003.
4. ГОСТ 12.1.004-91*. Пожарная безопасность. – М., 1992.
5. СНиП 2.04.01-85*. Внутренний противопожарный водопровод.
6. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
7. СНиП 2.08.01-89*. Жилые здания.
8. СНиП 2.08.02-89*. Общественные здания и сооружения.
9. НПБ 88-01. Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования.
10. НПБ 110-03. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и автоматической пожарной сигнализацией.
11. Правила устройства электроустановок.