

А. А. Качалов  
Ю. П. Воротынцев  
А. В. Власов

# ПРОТИВОПОЖАРНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Рекомендовано Управлением учебных заведений  
и научно-исследовательских учреждений МВД СССР  
в качестве учебника для пожарно-технических  
учебных заведений

Москва Стройиздат 1985

ББК 38.96  
К 30  
УДК 628.174.614.84(075.32)

Рецензенты — зам. начальника нормативно-технического отдела ГУПО МВД СССР Ю. М. Кондрашин и преподаватель Ивановского пожарно-технического училища МВД СССР А. А. Корочкин.

Качалов А. А. и др.

К 30 Противопожарное водоснабжение: Учеб. для пожарно-техн. училищ / А. А. Качалов, Ю. П. Воротынцев, А. В. Власов. — М.: Стройиздат, 1985. — 286 с., ил.

Изложены основные законы гидравлики. Даны примеры их практического применения в противопожарном водоснабжении. Рассмотрены принципы проектирования, испытания и обследования систем противопожарного водоснабжения населенных пунктов и отдельных предприятий. Приведена методика расчета системы наружного водопровода промышленного объекта. Описано безводопроводное противопожарное водоснабжение.

Для учащихся пожарно-технических училищ.

К 3405000000—380  
047(01)—85 153—85

ББК 38.96  
6С9.6

© Стройиздат, 1985

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В Материалах XXVI съезда и последующих Пленумов ЦК КПСС подчеркнуто, что конечной целью экономической стратегии партии, усилий в хозяйственном строительстве является улучшение условий жизни людей, повышение их благосостояния. На совещании по вопросам ускорения научно-технического прогресса Генеральный секретарь ЦК КПСС М. С. Горбачев подчеркнул, что главное сейчас — изыскать и привести в действие все резервы повышения эффективности производства, качества продукции. Наши кадры должны понять жизненную необходимость переориентации каждого предприятия, отрасли, всего народного хозяйства на интенсивный путь развития.

Все, что составляет экономический потенциал страны, является народным достоянием и требует рачительного отношения, надежной защиты и охраны. Поэтому на всех этапах хозяйственного строительства партия и правительство большое внимание уделяли предупреждению пожаров, обеспечению условий для быстрой их ликвидации. Пожары на объектах промышленности, сельского хозяйства, на транспорте, в общественных и жилых зданиях — это бедствия, которые нередко сопровождаются гибелью людей и безвозвратными материальными потерями.

Сложность вопросов пожаротушения, особенно проведения спасательных работ, требует от специалистов служб и подразделений пожарной охраны всесторонних знаний, высокого профессионализма, тренированности и соответствующей психологической подготовки, позволяющих ликвидировать пожары с минимальным ущербом.

Одним из основных факторов, обеспечивающих успешную борьбу с огнем, является водоснабжение.

Современные системы водоснабжения представляют собой сложные инженерные сооружения и устройства, обеспечивающие надежную подачу воды потребителям. С развитием водоснабжения населенных мест и промышленных предприятий улучшается и их противопожарная защита, так как при проектировании, строительстве и реконструкции водопроводов учитывается обеспечение не только хозяйственных, производственных, но и противопожарных нужд.

Настоящий учебник написан в соответствии с программой курса, утвержденной Управлением учебных заведений и научно-исследовательских учреждений МВД СССР. В нем изложены основные теоретические и практические сведения о проектировании и устройстве противопожарного водоснабжения, рассмотрено их применение при экспертизе проектов, обследовании и эксплуатации водопроводов.

Предисловие, главы 1—7 написаны канд. техн. наук А. А. Качаловым, главы 8, 9, 11—13 — канд. техн. наук Ю. П. Воротынцевым, главы 10, 14—16 — инженером А. В. Власовым.

Авторы выражают свою признательность рецензентам рукописи Ю. М. Кондрашину и А. А. Корочкину за полезные советы и замечания, которые позволили улучшить ее содержание.

## РАЗДЕЛ I. ГИДРАВЛИКА

### § 1. Исторический обзор развития гидравлики и водоснабжения

Гидравликой называется наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и разрабатывающая методы применения этих законов в различных областях производственной деятельности и инженерной практики. Знание основных законов гидравлики необходимо при разработке систем водоснабжения и канализации, гидротехники и мелиорации, гидроэнергетики и водного транспорта. Основные законы гидравлики используют и в пожарном деле при изучении условий транспортировки воды по трубам и пожарным рукавам, создании дальнобойных и распыленных водяных струй, эксплуатации пожарных насосов, водоемов и т. д.

Начало развития гидравлики относится к античному периоду. Еще за 250 лет до н. э. появился трактат Архимеда «О плавающих телах», где был сформулирован закон о воздействии воды на погруженное в нее тело.

Дальнейшее развитие гидравлика как наука получила в средние века. В XV веке Леонардо да Винчи (1452—1519 гг.) написал труд «О движении и измерении воды». В 1586 г. была опубликована работа С. Стевина «Начала гидростатики», в 1612 г. — работа Г. Галилея «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и тех, которые в ней движутся»; в 1643 г. Э. Торичелли открыл закон истечения жидкости из отверстий, в 1650 г. Б. Паскаль сформулировал закон о передаче давления внутри жидкости. В 1687 г. И. Ньютон высказал гипотезу о внутреннем трении в движущейся жидкости.

Дальнейшее развитие гидравлики связано с именами ученых Российской академии наук М. В. Ломоносова, Д. Бернулли и Л. Эйлера.

Великий русский ученый М. В. Ломоносов опубликовал ряд работ по гидравлике, в том числе «Рассуждение о твердости и жидкости тела», в последней сформулирован закон сохранения вещества и движения, положенный в основу современной гидравлики.

Д. Бернулли в 1738 г. опубликовал капитальный труд «Гидродинамика», в котором предложил метод изучения законов движения жидкости, ввел понятие «гидродинамика» и предложил теорему о запасе энергии

движущейся жидкости, известную под названием уравнения Бернулли, положенное в основу ряда разделов гидравлики. В сочинении «Общие принципы движения жидкости» (1755 г.) Л. Эйлер вывел уравнения движения идеальной жидкости, ввел понятие давления в точке движущейся и покоящейся жидкости, получил уравнение неразрывности жидкости.

Инженерное применение теоретических основ гидродинамики получило отражение в работах зарубежных ученых XVIII в. — А. Шеши, Д. Вентури, А. Дарси, О. Рейнольдса и др.

Широко известны работы Н. Е. Жуковского, создавшего теорию гидравлического удара в трубах, Н. П. Петрова, разработавшего гидравлическую теорию смазки. Работы немецкого ученого Л. Прандтля (1875—1953 гг.) посвящены изучению турбулентных потоков, итогом их явилось создание полуэмпирических теорий турбулентности, получивших широкое практическое применение.

Большой вклад в развитие гидравлики внесли советские ученые: Н. Н. Павловский, А. Н. Колмогоров, С. А. Христианович, М. А. Великанов, А. Я. Милович и многие другие.

Как видно из изложенного, наука о равновесии и движении жидкостей возникла и стала развиваться еще до нашей эры. Однако практика сооружения источников водоснабжения еще древнее.

История водоснабжения начинается за 3000 лет до н. э., когда воду с помощью простейших механизмов брали из колодцев. В период расцвета Древней Греции и Рима имелось уже несколько водопроводов, по которым вода подавалась самотеком.

Первые водопроводы в ряде русских городов были сооружены в XI—XII вв. Так, при раскопках в Новгороде был обнаружен водопровод из деревянных труб, время постройки которого относится к концу XI в. Имеются сведения о самотечном водопроводе из гончарных труб, построенном в Грузии в XIII в.

В XV в. был сооружен родниковый водопровод для Московского Кремля, а в первой половине XVIII в. — водопроводные сооружения в Петербурге, Петергофе, Царском Селе. В 1804 г. закончено строительство первого московского (мытищинского) водопровода.

Всего в дореволюционной России централизованные

системы водоснабжения имелись в 215 городах (около 20% их общего числа).

С первых дней Советской власти серьезное внимание в стране уделяется водоснабжению. Только за годы первой и второй пятилеток было построено свыше 100 новых городских водопроводов, а в настоящее время практически не осталось населенных пунктов, в которых бы его не было. Водоснабжение превратилось в крупную отрасль народного хозяйства. При этом много труда в разработку инженерных вопросов водопроводной техники, научных основ и методов проектирования и расчета водопроводных сооружений вложили советские ученые А. А. Сурин, Н. Н. Гениев, В. Г. Лобачев, Н. Н. Абрамов, Н. А. Тарасов-Агалаков и другие.

Гидравлика находит широкое применение при решении вопросов эксплуатации пожарных насосов, транспортирования воды по водопроводным трубам и пожарным рукавам, создания дальнобойных и распыленных водяных струй, строительства и эксплуатации источников водоснабжения, запасных резервуаров, водонапорных и других гидротехнических сооружений. Значительный вклад в изучение и развитие теории и практики водоснабжения внесли русские ученые и инженеры. Так, большая работа по составлению проектов и строительству водопроводов в городах России для целей пожаротушения была проделана под руководством Н. П. Зимина. Он изобрел первый в России надежный гидрант, известный под названием пожарного гидранта московского типа. По проекту Н. П. Зимина был построен и первый противопожарный водопровод в Москве в 1885 г.

В 1938 г. в СССР был открыт Центральный научно-исследовательский институт противопожарной обороны (ЦНИИПО), ставший центром научно-исследовательских работ в самых различных областях пожарного дела, в том числе и в области гидравлики и противопожарного водоснабжения. Под руководством профессора В. Г. Лобачева здесь были проведены обширные исследования по гидравлике пожарных струй, экономическому расчету водопроводных сетей и другим вопросам. Советские ученые продолжают работать над развитием и совершенствованием пожарной техники, автоматики и противопожарного водоснабжения.

## § 2. Основные физические свойства жидкостей

**Жидкостью** называют физическое тело, обладающее свойством текучести и характеризующееся малым сцеплением между частицами, вследствие чего жидкость не имеет собственной формы и принимает форму сосуда, в котором находится. Жидкости подразделяют на два вида: капельные и газообразные.

**Капельные** — характеризуются большим сопротивлением сжатию (почти полной несжимаемостью) и малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям, обусловленным незначительностью сил сцепления и сил трения между составляющими их частицами. В сосуде они образуют свободную поверхность. **Газообразные** — в отличие от капельных почти не обладают сопротивлением сжатию, они не образуют пограничную свободную поверхность, а заполняют весь предоставленный им объем. Гидравлика изучает капельные жидкости. При решении практических задач гидравлики часто пользуются понятием идеальной жидкости, характеризующейся абсолютной несжимаемостью, текучестью.

К основным физическим свойствам жидкости относят плотность, удельный вес, сжимаемость, температурное расширение, вязкость.

**Плотность жидкости**  $\rho$  — это масса единицы ее объема, рассчитывают ее как отношение массы жидкости к ее объему:

$$\rho = m/W, \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

где  $m$  — масса жидкости объемом  $W$ .

**Удельный вес**  $j$  представляет собой вес единицы ее объема:

$$j = G/W, \text{ Н/м}^3, \quad (2)$$

где  $G$  — вес жидкости объемом  $W$ .

Между удельным весом и плотностью существует связь, которую можно выразить, исходя из зависимости между весом тела  $G$ , его массой  $m$  и ускорением свободного падения  $g$ , которая определяется формулой:  $G = mg$ .

Подставив значение веса жидкости  $G$  в формулу удельного веса, получим зависимость:

$$j = G/W = mg/W = \rho g.$$



Плотность и удельный вес жидкости зависят от температуры. Известно, что максимальная плотность воды наблюдается при 4°C и уменьшается при колебаниях температуры в любую сторону. Однако эти изменения довольно незначительны, и в практических расчетах плотность воды можно считать постоянной.

Величины плотности  $\rho$  и удельного веса  $j$  некоторых жидкостей указаны в табл. 1.

Таблица 1. Плотность и удельный вес жидкостей

Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельный вес $j$ , Н/м <sup>3</sup>
Вода	1000	9810
Бензин	740—750	7250—7360
Керосин	790—840	7750—8240
Нефть	850—950	8340—9320
Мазут	890—940	8730—9220
Ртуть	13600	133400

**Сжимаемость** — это свойство жидкости изменять свой объем при изменении давления. Она характеризуется коэффициентом объемного сжатия  $\beta$ , выражающим относительное уменьшение объема жидкости при увеличении давления  $p$  на единицу измерения:

$$\beta = \frac{W_1 - W_2}{(p_2 - p_1) W_1}$$

Коэффициент объемного сжатия воды при увеличении давления с 0,1 до 50 МПа практически не изменяется. В связи с этим при решении многих практических задач сжимаемостью капельных жидкостей обычно пренебрегают. Величина, обратная коэффициенту  $\beta$ , называется модулем объемной упругости  $E = 1/\beta$ , он измеряется в паскалях (Па).

**Температурное расширение жидкости** при изменении температуры характеризуется коэффициентом температурного расширения  $\beta_t$ , который определяет относительное изменение объема жидкости при изменении ее температуры на 1°C или 1°K.

$$\beta_t = \frac{W_2 - W_1}{(t_2 - t_1) W_1}$$

Коэффициент температурного расширения выражается в градусах Цельсия или Кельвина в минус пер-

вой степени. Для капельных жидкостей он ничтожно мал. Поэтому в практических расчетах температурное расширение этих жидкостей не учитывается.

**Вязкостью** называется свойство жидкости оказывать сопротивление относительно движению (сдвигу) ее частиц. Вязкость проявляется только при движении реальной жидкости.

Для пояснения понятия вязкости рассмотрим случай движения жидкости параллельными слоями (рис. 1). Пусть скорость движения какого-либо слоя  $A$  равна  $v$ , а скорость соседнего слоя  $B$  больше на величину  $\Delta v$ . Величина  $\Delta v$  выражает собой абсолютный сдвиг слоя  $B$  по отношению к слою  $A$  за единицу времени. При скольжении этих слоев жидкости относительно друг друга между ними возникает препятствующая сдвигу сила трения. Относя силу трения к единице площади трения, получим касательное напряжение или силы трения  $\tau$ . Отношение  $\Delta v$  к расстоянию между центрами слоев  $\Delta y$  называется относительным сдвигом. Ньютон установил, что сила трения  $\tau$ , приходящаяся на единицу площади, прямо пропорциональна относительному сдвигу:

$$\tau = \mu \Delta v / \Delta y,$$

где  $\mu$  — коэффициент внутреннего трения или динамический коэффициент вязкости, Па·с.

В гидравлике наряду с динамической вязкостью при расчетах используют так называемый кинематический коэффициент вязкости, представляющий собой отношение динамического коэффициента вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \mu / \rho, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вязкость зависит от вида жидкости и ее температуры. В табл. 2 указаны значения кинематической вязкости воды при различной температуре.

Таблица 2. Кинематическая вязкость воды

$t$ , °C	$10^6 \nu$ , м <sup>2</sup> /с	$t$ , °C	$10^6 \nu$ , м <sup>2</sup> /с	$t$ , °C	$10^6 \nu$ , м <sup>2</sup> /с
0	1,78	15	1,14	40	0,66
5	1,52	20	1,01	50	0,55
10	1,31	30	0,81	60	0,48

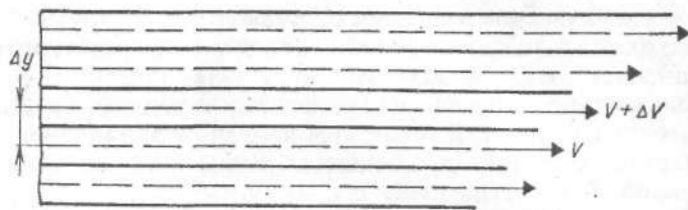


Рис. 1. Схема, поясняющая понятие вязкости при движении жидкости с параллельными слоями

Вязкость каплежидкостей уменьшается с увеличением температуры, а вязкость газов, наоборот, возрастает. Объясняется это различием самой природы вязкости жидкостей и газов. В жидкостях молекулы расположены гораздо ближе друг другу, чем в газах, и вязкость вызывается силами молекулярного сцепления. Эти силы с увеличением температуры уменьшаются, поэтому вязкость снижается. В газах вязкость обусловлена в основном хаотичным тепловым движением молекул, интенсивность которого увеличивается с ростом температуры, что и приводит к увеличению вязкости.

## ГЛАВА I. ОСНОВЫ ГИДРОСТАТИКИ

### § 3. Гидростатическое давление и его свойства

**Гидростатика** — раздел гидравлики, изучающий законы равновесия покоящейся жидкости.

Жидкость, находящаяся в покое, испытывает действие внешних сил двух категорий: массовых и поверхностных. К массовым (или объемным) относятся силы, пропорциональные массе жидкости (или при постоянной плотности среды — объему). Примером массовых сил является сила тяжести и силы инерции. К поверхностным относятся силы, которые действуют на поверхности выделенного объема жидкости и пропорциональны площади этой поверхности. В качестве примера действия поверхностных сил можно рассматривать давление поршня на жидкость, атмосферное давление на свободную поверхность жидкости и т. п.

Эти силы распределяются по поверхности выделенного объема жидкости непрерывно.

Под действием внешних сил в каждой точке жидкости возникают внутренние силы, обуславливающие ее напряженное состояние и характеризующиеся давлением.

Рассмотрим некоторый объем покоящейся жидкости (рис. 2), наметим в нем произвольное сечение  $B—C$ , на плоскости его выделим произвольную точку  $A$  и обозначим около нее малую площадку  $\omega$ . В центре этой площадки действует сила  $P$ , представляющая собой равнодействующую сил, приложенных к различным точкам площадки  $\omega$ . Разделив значение силы  $P$  на  $\omega$ , получим среднее значение гидростатического давления на единицу площади:

$$p_{\text{ср}} = P/\omega. \quad (3)$$

Если плоскость сечения  $B—C$  расположена горизонтально, параллельно свободной поверхности жидкости, то во всех точках сечения среднее гидростатическое давление одинаково. Если же сечение расположено не горизонтально, то в разных точках гидростатическое давление будет различно, находясь в зависимости от глубины погружения в жидкость. В связи с этим вводится понятие — гидростатическое давление в данной точке. Разница между давлением в точке и средним давлением в пределах площадки  $\omega$  будет тем меньше, чем меньше эта площадка.

Если уменьшать площадку  $\omega$ , то среднее гидростатическое давление будет стремиться к некоторому пределу, выражающему гидростатическое давление в точке:

$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} (P/\omega).$$

Таким образом, гидростатическое давление в точке является пределом отношения силы давления, действующей на элементарную площадку, при стремлении этой площадки к нулю.

За единицу давления в системе СИ принято равномерно распределенное давление, при котором на площадь в  $1 \text{ м}^2$  перпендикулярно действует сила  $1 \text{ Н}$ ; эта единица называется паскалем (Па). Наряду с этой единицей давления применяют такие, как килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа)

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

На практике широко используется внесистемная единица — техническая атмосфера (ат), равная  $0,1 \text{ МПа}$ .

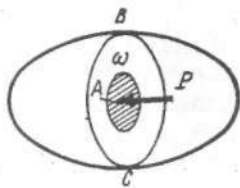


Рис. 2. Схема, поясняющая понятие гидростатического давления

Гидростатическое давление обладает двумя свойствами. *Первое свойство.* Гидростатическое давление всегда направлено по внутренней нормали к площадке, на которую оно действует. Для установления справедливости первого свойства используем метод доказательства от противного.

Предположим, что в точке  $A$  (рис. 2) сила  $P$  направлена внутрь объема, но не перпендикулярно, а под некоторым углом к площадке. В этом случае силу  $P$  можно было бы разложить на две составляющие: одну, направленную по внутренней нормали, и другую — по касательной к площадке действия. Из-за неспособности жидкости, находящейся в покое, сопротивляться сдвигу касательная сила вывела бы жидкость из состояния равновесия. Точно так же нарушится покой жидкости, если сила  $P$  окажется направленной по внешней нормали. Поскольку жидкость не оказывает сопротивления растягивающим напряжениям, частицы ее должны были прийти в движение, что противоречит принятому условию о нахождении жидкости в покое. Следовательно, единственно возможным является направление гидростатического давления по нормали внутрь рассматриваемого объема жидкости, т. е. гидростатическое давление представляет собой напряжение сжатия.

*Второе свойство.* Гидростатическое давление в любой точке жидкости действует одинаково по всем направлениям, т. е. не зависит от угла наклона площадки, на которую оно действует. Для доказательства этого свойства выделим около точки  $O$  в объеме жидкости, находящейся в равновесии, элементарный прямоугольный тетраэдр с бесконечно малыми сторонами

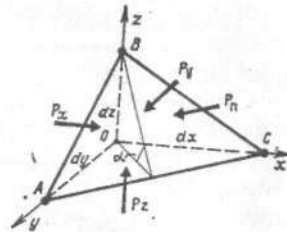


Рис. 3. Схема к доказательству второго свойства гидростатического давления

$dx, dy, dz$  и объемом  $dW$  (рис. 3). На грани тетраэдра действуют силы гидростатического давления

$$P_x = p_x dy dz / 2; \quad P_y = p_y dx dz / 2; \\ P_z = p_z dx dy / 2 \quad \text{и} \quad P_n = p_n \omega,$$

где  $p_x, p_y, p_z, p_n$  — средние гидростатические давления, действующие на грани,  $\omega$  — площадь наклонной грани  $ABC$ .

Кроме сил давления на тетраэдр действует сила тяжести  $G$ , проекции которой на оси  $x$  и  $y$  равны 0, а проекция на ось  $z$  составляет  $G_z = 1/6 \rho g dx dy dz$ , т. е. величина очень малая и ею можно пренебречь.

Тетраэдр будет находиться в покое, если суммы проекций всех действующих сил на оси координат будут равны нулю. Уравнение равновесия сил по оси  $x$  будет иметь следующий вид:

$$P_x - P_n \cos(P_n, x) = 0$$

или

$$p_x dy dz / 2 - p_n \omega \cos(P_n, x) = 0,$$

где  $(P_n, x)$  — угол, который образует нормаль  $P_n$  к наклонной грани  $ABC$  с осью  $x$ .

Учитывая, что проекция площадки  $\omega$  на координатную плоскость  $yoz$  составляет:  $\omega \cos(P_n, x) = dy dz / 2$  уравнение равновесия по оси  $x$  примет такой вид:

$$p_x dy dz / 2 = p_n dy dz / 2$$

$$\text{или } p_x = p_n.$$

Аналогичным образом получим еще два уравнения равновесия по осям  $y$  и  $z$ . Таким образом,

$$p_x = p_n; \quad p_y = p_n; \quad p_z = p_n$$

или

$$p_x = p_y = p_z = p_n.$$

Так как положение наклонной грани выбрано произвольно, то это равенство справедливо при любом наклоне площадки.

#### § 4. Основное уравнение гидростатики

Рассмотрим жидкость, находящуюся в покое, и определим гидростатическое давление  $p$  в точке  $A$  на бесконечно малой площадке  $d\omega$ , расположенной на глубине  $h$  от свободной поверхности жидкости и параллельной ей (рис. 4). Выделим над этой площадкой цилиндрический объем жидкости, заменив действие окружающей среды поверхностными силами: давления на свободную поверхность  $p_0 d\omega$ , на нижнее основание

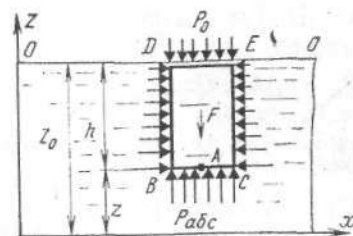


Рис. 4. Схема к выводу основного уравнения гидростатики

цилиндра  $p d\omega$ . Силы давления жидкости на боковую поверхность цилиндра взаимноуравновешиваются. На выделенный объем действует также массовая сила, равная силе тяжести  $G = \rho g h d\omega$ .

Запишем уравнение равновесия действующих сил относительно оси  $z$

$$p d\omega = \rho g h d\omega - p_0 d\omega = 0.$$

Сократив члены этого уравнения на  $d\omega$ , получим **основное уравнение гидростатики**:

$$p = p_0 + \rho g h. \quad (4)$$

Если в уравнении (4) заменить  $h$  на  $(z_0 - z)$ , то получим:

$$p = p_0 + \rho g (z_0 - z). \quad (5)$$

Разделим все члены уравнения (5) на  $\rho g$  и перегруппируем их таким образом:

$$z + p/\rho g = z_0 + p_0/\rho g. \quad (6)$$

Поскольку для любой точки жидкости координата свободной поверхности  $z_0$  и давление  $p_0$  остаются постоянными, правая часть этого уравнения есть величина постоянная. Следовательно, можно сказать, что для всех точек рассматриваемого объема покоящейся жидкости

$$z + p/\rho g = \text{const}. \quad (7)$$

Это другая форма записи основного уравнения гидростатики. Из уравнения (4) видно, что с увеличением глубины погружения точки давление будет повышаться. Из основного уравнения гидростатики следует также, что в покоящейся жидкости всякая горизонтальная плоскость, в том числе и свободная поверхность жидкости ( $h = \text{const}$ ), является плоскостью равного давления.

## § 5. Пьезометрический и гидростатический напоры. Вакуум

Различают следующие виды давления: атмосферное (барометрическое), абсолютное (полное), избыточное (манометрическое) и вакуумметри-

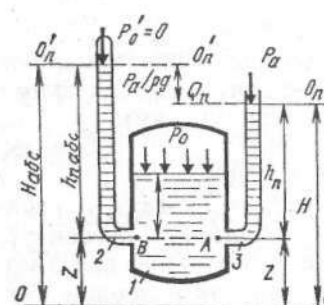


Рис. 5. Пьезометры

1 — закрытый сосуд с жидкостью;  
2 — пьезометр закрытого типа; 3 — пьезометр открытого типа

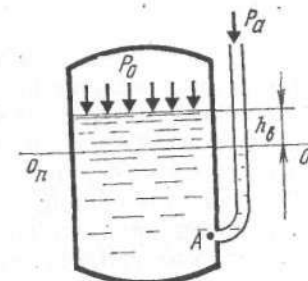


Рис. 6. Схема, поясняющая понятие вакуума

ческое. Атмосферное давление  $p_a$  зависит от высоты места над уровнем моря и состоянием погоды. За нормальное атмосферное давление принимают давление, создаваемое столбом ртути высотой 760 мм, что соответствует приблизительно 10 м вод. ст., или 0,1 МПа. Абсолютное (или полное) гидростатическое давление  $p_{абс}$ , определяемое по уравнению (4), состоит из внешнего давления на свободную поверхность и избыточного давления, которое создает слой жидкости высотой  $h$ .

Рассмотрим закрытый сосуд с жидкостью, к которому в точке  $A$  присоединен пьезометр, представляющий собой открытую сверху стеклянную трубку (рис. 5). Если давление на свободной поверхности жидкости в сосуде  $p_0$  превышает атмосферное, уровень жидкости в пьезометре будет выше уровня в сосуде. Применяя формулу (4) к данному случаю, получим значение абсолютного давления в точке  $A$ :

$$p_{абс} = p_a + \rho g h_{п}, \quad (8)$$

где  $p_a$  — атмосферное давление;  $h_{п}$  — высота подъема жидкости в пьезометре.

Под избыточным давлением  $p$  подразумевают разность между абсолютным давлением и атмосферным.

Из уравнения (8) находим его значение:

$$p = p_{абс} - p_a = \rho g h_{п}. \quad (9)$$

Отсюда высота подъема жидкости в пьезометре равна:

$$h_{п} = \frac{p_{абс} - p_a}{\rho g} = \frac{p}{\rho g}, \quad (10)$$



где  $p$  — избыточное давление в жидкости на уровне присоединения пьезометра.

Кроме пьезометров избыточное давление измеряют жидкостными, например ртутными, и механическими (пружинными и мембранными) манометрами.

Высота поднятия жидкости в пьезометре  $h_{\text{п}}$  называется пьезометрическим напором.

Если из стеклянной трубки удалить воздух и верхний конец запаять, то получим закрытый пьезометр. Очевидно, что уровень жидкости в закрытом пьезометре будет выше, чем в открытом, так как в первом отсутствует атмосферное давление. Таким образом, высота подъема жидкости в открытом пьезометре соответствует избыточному (манометрическому) давлению, а в закрытом — абсолютному (полному) давлению.

Величину  $z$ , отсчитываемую от некоторой произвольной горизонтальной плоскости — плоскости отсчета, называют высотой положения и геометрическим напором.

Сумма двух напоров — геометрического  $z$  и пьезометрического  $p/\rho g$  — относительно плоскости отсчета  $0-0$  называется гидростатическим напором  $H$ .

$$H = z + p/\rho g. \quad (11)$$

Графически уравнение (11) представляется в виде горизонтальной плоскости, проведенной на расстоянии  $H$  параллельно плоскости отсчета. Если при расчетах учитывается не избыточное, а абсолютное давление, то плоскость гидростатического напора поднимается на высоту, соответствующую атмосферному давлению  $p_a/\rho g$ .

Если давление на свободной поверхности жидкости  $p_a$  меньше атмосферного, то плоскость пьезометрического напора будет расположена ниже уровня свободной поверхности жидкости в сосуде на величину  $h_v$  (рис. 6). В этом случае абсолютное давление в жидкости ниже плоскости  $0_n-0_n$  будет больше атмосферного, а выше этой плоскости — меньше атмосферного. Если абсолютное давление в жидкости меньше атмосферного, то говорят, что имеется разрежение, или вакуум, который выражает разность между значением атмосферного и абсолютного давления

$$p_v = p_a - p_{\text{абс}} \quad (12)$$

или

$$h_v = \frac{p_v}{\rho g} = \frac{p_a - p_{\text{абс}}}{\rho g}.$$

Так как нижним пределом для абсолютного давления в жидкости является нуль, то максимальное значение вакуума численно равно атмосферному давлению, т. е. максимальная вакуумметрическая высота для воды приблизительно равна 10 м. Вакуум в жидкости измеряется с помощью приборов, называемых вакуумметрами.

С физической точки зрения гидростатический напор  $H$  представляет собой удельную потенциальную энергию покоящейся жидкости, состоящую из удельной энергии положения  $z$  и удельной энергии давления  $p/\rho g$ . Под удельной энергией при этом подразумевается энергия единицы веса жидкости.

Действительно, все слагаемые уравнения  $H = z + p/\rho g$  имеют линейную размерность: Если умножить это уравнение на размерную величину 1 Н (силу), то все слагаемые приобретут размерность работы или энергии (Дж). Очевидно, что уравнение это будет определять потенциальную энергию жидкости весом 1 Н. В этом случае уравнение (7) можно сформулировать так: сумма удельной энергии положения  $z$  и удельной потенциальной энергии давления  $p/\rho g$  есть величина постоянная во всех точках покоящейся массы жидкости.

## § 6. Эпюры гидростатического давления

Эпюры давления дают графическое изображение закона распределения гидростатического давления в жидкости. При построении эпюр учитывают, что давление нормально к стенке, а уравнения (4) и (9), характеризующие распределение абсолютного и избыточного давлений на глубине, являются уравнениями прямой линии.

На рис. 7 показаны эпюры избыточного и абсолютного гидростатического давления, действующего на вертикальную и наклонную плоские стенки. Для их построения достаточно отложить в выбранном масштабе по нормали к стенке величины гидростатического давления на поверхности жидкости и у дна, соединив их прямой линией. Из рисунка следует, что эпюра избыточного давления на плоскую стенку изображается в виде треугольника, так как избыточное давление в точке А равно

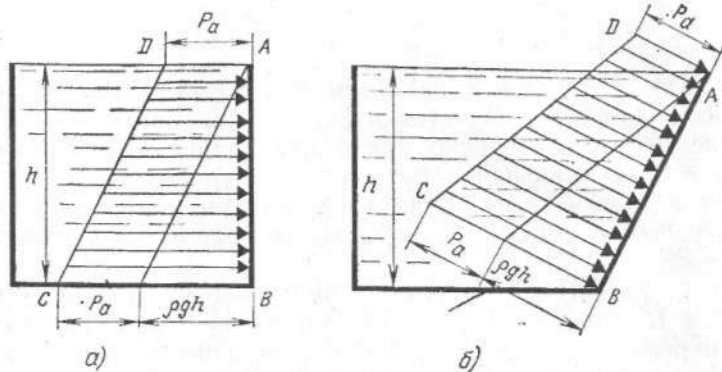


Рис. 7. Эпюры избыточного и абсолютного гидростатического давления  
а — на вертикальную стенку; б — на наклонную стенку



Рис. 8. Схема, поясняющая явление гидростатического парадокса  
1, 2, 3, 4 — варианты различной формы сосудов

нулю и достигает максимальной величины в точке В на дне резервуара, где оно равно  $p_B = \rho gh$ .

При построении эпюры абсолютного гидростатического давления необходимо дополнительно учитывать атмосферное давление над свободной поверхностью, которое будет оказывать одинаковое воздействие на стенку по всей глубине жидкости. Из приведенных рисунков следует, что эпюра абсолютного гидростатического давления представляет собой трапецию.

Эпюра гидростатического давления на горизонтальное дно резервуара представляет собой прямоугольник, так как при постоянной глубине гидростатическое давление на дно — величина постоянная. Сила избыточного давления на плоское дно сосуда определяется выражением

$$P = \rho gh \omega. \quad (13)$$

Из этой формулы видно, что сила давления жидкости на дно сосуда зависит от площади дна  $\omega$  и глубины жидкости в сосуде  $h$  и не зависит от формы сосуда, в котором она находится. В связи с этим для сосудов раз-

ной формы (рис. 8), заполненных одной и той же жидкостью на одинаковую высоту  $h$  и имеющих одинаковую площадь дна, сила давления жидкости на дно будет одинакова. Это свойство жидкости известно под названием гидростатического парадокса.

Очевидно, что сила тяжести жидкости, налитой в сосуда, различна и может отличаться от силы давления на дно сосуда. Так, в расширяющемся кверху сосуде сила давления на дно меньше силы тяжести жидкости, а в сужающемся — больше. В цилиндрическом сосуде обе силы одинаковы.

## § 7. Давление жидкости на плоские стенки

Используя основное уравнение гидростатики, можно найти силу давления жидкости на различные поверхности. Эта задача имеет большое практическое значение при расчетах гидротехнических сооружений, резервуаров, предохранительных клапанов в технологических аппаратах.

Возьмем плоскую прямоугольную стенку ABCD шириной  $b$ , наклонную к горизонту под углом  $\alpha$  (рис. 9). Рассмотрим только избыточное давление на эту стенку; поверхностное давление учитывать не будем, так как оно, действуя через жидкость на стенку слева, полностью уравновешивается атмосферным давлением, действующим на стенку справа.

Выделим на стенке ABCD бесконечно малую горизонтальную полоску высотой  $dl$ . Ввиду малой высоты выделенного элемента гидростатическое давление во всех его точках можно считать одинаковым и равным  $\rho gh^1$ .

Элементарная сила избыточного давления на полоску будет равна:

$$dP = \rho gh' b dl, \quad (14)$$

где  $\rho gh' b dl$  представляет собой элемент площади эпюры гидростатического давления  $d\omega$ .

Вся эпюра давления на плоскую стенку изображена треугольником ABE площадью  $\omega$ . Площадь самой стенки можно представить состоящей из элементарных полосок, на каждую из которых передается со стороны жидкости давление, определяемое по формуле (14), которое непрерывно изменяется по мере изменения глубины  $h$ , но всегда направлено перпендикулярно плоскости стенки.

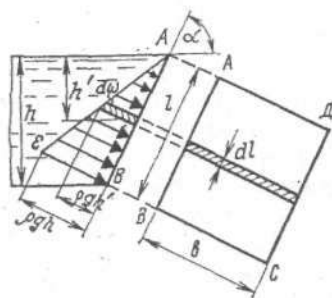
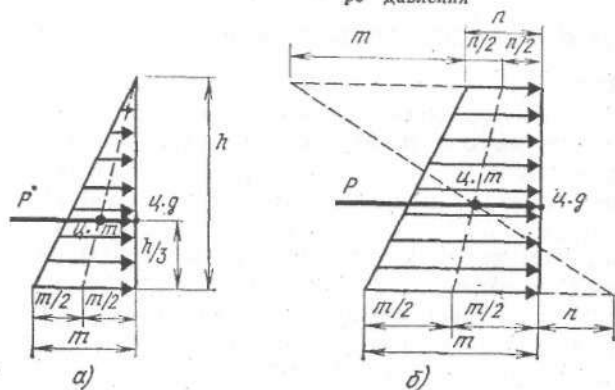


Рис. 9. Схема определения силы давления жидкости на плоскую стенку

Рис. 10. Определение центра давления жидкости на плоские стенки  
а — при треугольной эпюре давления; б — при трапециoidalной эпюре давления



Сила давления жидкости на стенку ABCD будет равна сумме параллельных, непрерывно изменяющихся элементарных сил, т. е. интегралу уравнения (14) в пределах всей площади эпюры давления:

$$P = \int_{\omega} \rho g h' b dl = b \int_{\omega} d\omega = b \omega,$$

где  $\omega$  — площадь эпюры гидростатического давления.

Таким образом, сила давления жидкости на плоскую прямоугольную стенку определяется произведением площади эпюры гидростатического давления на ширину стенки, т. е.

$$P = b \omega.$$

Сила давления на плоскую стенку может быть также выражена весом жидкости, заключенной в объеме призмы, имеющей основанием эпюру гидростатического давления ABE, а высотой — ширину стенки b.

Отметим, что сила гидростатического давления как равнодействующая элементарных сил должна проходить

через центр тяжести (ц. т.) эпюры давления и быть направлена нормально к рассматриваемой поверхности. Точку приложения равнодействующей силы давления называют центром давления (ц. д.).

Известно, что центр тяжести треугольной фигуры (рис. 10, а) лежит на расстоянии  $h/3$  от основания; если же эпюра давления изображена трапецией, то центр тяжести ее находится на пересечении медианы с линией, соединяющей продолжения оснований (рис. 10, б).

## § 8. Простейшие гидравлические машины

Основное уравнение гидростатики  $p = p_0 + \rho g h$  показывает, что давление на поверхности жидкости  $p_0$  передается в любую точку внутри жидкости без изменения. В связи с этим, учитывая второе свойство гидростатического давления, можно сформулировать закон Паскаля: **давление, приложенное к свободной поверхности жидкости, передается во все точки жидкости без изменения.** На законе Паскаля основано устройство простейших гидравлических машин: прессов, домкратов, подъемников и т. д.

Простейшие гидравлические машины превращают потенциальную энергию гидростатического давления в механическую работу. Основным элементом таких машин является силовой цилиндр. Если давление жидкости в силовом цилиндре равно  $p$ , то сила давления жидкости  $P$  на поршень будет равна  $p\omega$ , где  $\omega$  — площадь поршня. Эта сила может быть использована для полезной работы. В пожарной технике силовые цилиндры находят применение в конструкциях автомеханических лестниц.

На рис. 11 показана схема гидравлического пресса, который состоит из двух сообщающихся между собой силовых цилиндров различного диаметра. Если на поршень малого цилиндра давить с силой  $P_1$ , то силу давления на другой поршень  $P_2$  определяют из условия равенства давлений  $p$  в обоих цилиндрах:

$$p = P_1/\omega_1 = P_2/\omega_2.$$

откуда  $P_2 = p\omega_2$ .

Отношение площади  $\omega_2$  большего поршня к площади  $\omega_1$  меньшего называется передаточным числом. Если поршни, как обычно, имеют круглую форму, то передаточное число  $n$  определяют по формуле

$$n = \omega_2/\omega_1 = (d_2/d_1)^2,$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — диаметры малого и большого поршней.

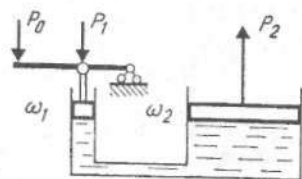


Рис. 11. Схема гидравлического пресса

На практике сила  $F$ , передаваемая, например, подъемному механизму, вследствие трения в поршнях и рычаге меньше  $P_2$ . Это уменьшение учитывается коэффициентом полезного действия, значение которого в среднем равно 0,85. Следовательно, расчетная формула силы давления гидравлического пресса будет иметь следующий вид:

$$F = \eta P_2 = \eta P_1 (\omega_2 / \omega_1)^2.$$

Таким образом, благодаря увеличению площади второго поршня получают соответствующий выигрыш в силе давления.