

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Г. Ходзинская, Т.В. Зоммер

ГИДРАВЛИКА И ГИДРОЛОГИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Учебное пособие

Москва 2014

УДК 621.22
ББК 39.71-022
Х69

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук, профессор *Ю.Л. Щевьев*,
заведующий кафедрой гидравлики и водоснабжения ФГБОУ ВПО «МГУПС»;
доктор технических наук, *В.Г. Николаев*, профессор кафедры гидравлики
и водных ресурсов ФГБОУ ВПО «МГСУ»

Ходзинская, А.Г.

Х69 Гидравлика и гидрология транспортных сооружений : учебное пособие / А.Г. Ходзинская, Т.В. Зоммер ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. Москва : МГСУ, 2014. 92 с.
ISBN 978-5-7264-0956-6

Приведены сведения по гидростатике и динамике жидкости, гидравлическим сопротивлениям, равномерному и неравномерному движениям жидкости, гидравлическим расчетам водопропускных сооружений, фильтрационным и гидрологическим расчетам при их проектировании.

Содержит теоретическую и практическую части, контрольные задания и рекомендации по их выполнению, примеры решения задач и справочные таблицы.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», профилей «Автомобильные дороги и аэродромы», «Автомобильные дороги», изучающих дисциплины «Основы гидравлики», «Основы гидравлики и гидрологии», «Основы гидравлики и гидрология транспортных сооружений».

**УДК 621.22
ББК 39.71-022**

ISBN 978-5-7264-0956-6

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные физические свойства жидкости.....	4
2. Гидростатика.....	5
2.1. Определение давления в покоящейся жидкости.....	8
3. Основы кинематики и динамики жидкости.....	11
4. Гидравлические сопротивления.....	14
4.1. Примеры расчета коротких трубопроводов.....	18
5. Установившееся равномерное движение жидкости в открытых руслах.....	25
5.1. Расчет канала и коллектора при равномерном движении	27
6. Установившееся неравномерное движение жидкости в открытых руслах.....	29
7. Водосливы и сопряжение бьефов.....	32
7.1. Расчет одноступенчатого перепада.....	37
7.2. Расчет выхода потока с быстротока.....	40
8. Гидравлика малых дорожных водопропускных сооружений.....	42
8.1. Малый мост.....	42
8.2. Водопропускные трубы.....	45
8.2.1. Труба прямоугольного сечения.....	46
8.2.2. Труба круглого сечения.....	47
9. Фильтрационные расчеты транспортных сооружений.....	51
9.1. Расчет фильтрующих насыпей.....	55
10. Основы гидрологии суши и гидрометрии.....	59
10.1. Питание и фазы водного режима рек.....	59
10.2. Гидрометрия.....	61
11. Гидрологические расчеты при проектировании водопропускных дорожных сооружений.....	62
Задание к контрольной работе.....	68
Задачи.....	70
Приложение.....	84
Литература.....	91

1. Основные физические свойства жидкости

Основные вопросы: Гидравлика. Роль гидравлики в решении технических задач дорожного строительства. Жидкость. Основные физические свойства капельных жидкостей и газов: текучесть, сжимаемость, температурное расширение, вязкость. Трение в жидкости, ньютоновская и неньютоновская жидкости. Модели жидкостей: идеальная и вязкая жидкости.

Гидравлика (механика жидкости и газа) – наука, в которой изучается равновесие и движение жидкостей, способы решения практических инженерных задач. Жидкости по молекулярному строению отличаются от твердых тел. По своим механическим свойствам жидкости разделяются на два класса: мало сжимаемые (капельные) и сжимаемые жидкости (газы). В случаях, когда сжимаемостью газов можно пренебречь, к ним применимы законы механики капельной жидкости. Жидкости обладают свойством текучести: они деформируются под действием любых малых внешних сил, пока внутренние касательные напряжения в них не станут равны нулю.

Изменение объема жидкостей при нагревании характеризуется коэффициентом температурного расширения

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{\Delta t W}, \quad (1)$$

где W – первоначальный объем; ΔW – изменение объема; Δt – изменение температуры.

При сжатии изменение объема жидкостей характеризуется коэффициентом объемного сжатия

$$\beta_w = -\frac{\Delta W}{\Delta p W}, \quad (2)$$

где Δp – изменение давления.

Капельная жидкость в отличие от газа мало изменяет свой объем при изменении температуры и давления.

Вязкость – свойство жидкостей оказывать сопротивление относительному перемещению слоев, вызывающему деформацию сдвига. В случае слоистого прямолинейного движения, согласно гипотезе Ньютона, касательное напряжение между слоями жидкости толщиной dz определяется по формуле

$$\tau = \mu \, du/dz, \quad (3)$$

где μ (Па·с) – динамическая вязкость; du – приращение скорости, соответствующее приращению вертикальной координаты dz ; du/dz – градиент скорости по нормали к поверхности соприкасающихся слоев жидкости.

Кинематическая вязкость

$$\nu = \mu/\rho \quad (\text{м}^2/\text{с}), \quad (4)$$

где μ – динамическая вязкость; ρ – плотность жидкости.

Вязкость жидкости существенно зависит от ее температуры и незначительно от давления (см. значения ν в табл. 1 прил.).

Сила внутреннего трения, возникающая между слоями жидкости

$$T = \tau\omega, \quad (5)$$

где τ – касательное напряжение между слоями; ω – площадь соприкасающихся слоев.

Жидкости, для которых зависимость (3) не выполняется, называются неньютоновскими или аномальными. К ним относятся: коллоидные суспензии, строительные и буровые растворы, мелкодисперсные концентрированные гидросмеси, осадки сточных вод и др.

Для неньютоновских жидкостей касательное напряжение

$$\tau = \tau_0 + \mu \, du/dz, \quad (6)$$

где τ_0 – начальное напряжение сдвига.

Для ньютоновских жидкостей $\tau_0 = 0$.

Для рассмотрения некоторых задач гидравлики в упрощенном виде Эйлером было введено понятие «идеальная» жидкость – воображаемая модель жидкости, у которой отсутствует вязкость и объем постоянен при изменении температуры и давления.

2. Гидростатика

Основные вопросы: Силы, действующие в жидкости. Гидростатическое давление и его свойства. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости (уравнения Эйлера). Поверхности равного давления. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля. Абсолютное и избыточное давления. Пьезометрическая высота. Гидростатический напор. Приборы для измерения давления. Сила давления жидкости на плоские и криволинейные поверхности. Центр давления. Закон Архимеда.

В гидростатике рассматривается жидкость, находящаяся в состоянии абсолютного или относительного покоя. Основной величиной, характеризующей напряженное состояние в жидкости, является

нормальное напряжение сжатия, которое называется гидростатическим давлением.

Первое свойство гидростатического давления: оно всегда направлено по внутренней нормали к площадке, на которую действует. Согласно второму свойству величина гидростатического давления в любой точке жидкости по всем направлениям одинакова, то есть не зависит от угла ориентировки площадки ($p = p_x = p_y = p_z$).

При рассмотрении в покоящейся жидкости элементарного объема, находящегося под действием поверхностных сил, определяемых гидростатическим давлением, а также массовых сил (сила тяжести и силы инерции – проекции единичных массовых сил на оси координат X, Y, Z), получается система дифференциальных уравнений равновесия жидкости, выведенная Эйлером

$$\begin{cases} -\partial p / \partial x + \rho X = 0; \\ -\partial p / \partial y + \rho Y = 0; \\ -\partial p / \partial z + \rho Z = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Интегрирование уравнений Эйлера в случае действия на жидкость одной лишь силы тяжести приводит к основному уравнению гидростатики

$$z + p/\gamma = z_0 + p_0/\gamma = \text{const}, \quad (8)$$

где z и z_0 – геометрические высоты, равные расстояниям от горизонтальной плоскости сравнения до данной точки и свободной поверхности, соответственно; p/γ – пьезометрическая высота, или высота подъема жидкости в трубке, соответствующая давлению в точке ее присоединения; p_0/γ – пьезометрическая высота, соответствующая давлению на свободной поверхности p_0 .

Гидростатический напор – сумма геометрической и пьезометрической высот – есть величина постоянная для всех точек данного объема жидкости.

Основное уравнение гидростатики может быть записано как выражение для давления в выделенной точке жидкости

$$p = p_0 + \gamma h, \quad (9)$$

где $\gamma = \rho g$ – удельный вес жидкости; γh – весовое давление столба жидкости высотой h ; h – глубина погружения точки относительно свободной поверхности.

Различают абсолютное (полное) давление $p_{аб}$ и избыточное давление $p_{из}$. Избыточное давление – это разность абсолютного давления $p_{аб}$ и атмосферного $p_{ат}$. Атмосферное давление при температуре 0°C на уровне моря $p_{ат} = 101,3 \text{ кПа}$.

Если абсолютное давление $p_{аб}$ больше атмосферного $p_{ат}$, избыточное давление положительно и может быть манометрическим

$$p_{из} = p_{аб} - p_{ат}. \quad (10)$$

Если абсолютное давление меньше атмосферного, имеется так называемое вакуумметрическое давление

$$p_{вак} = p_{ат} - p_{аб}. \quad (11)$$

Воздействие жидкости на плоские и криволинейные поверхности можно проиллюстрировать с помощью эпюр давления. При построении эпюры давления используют выражение (9). Эпюры являются нагрузочными характеристиками при расчете конструкции. Силу гидростатического давления жидкости на поверхность можно найти как объем эпюры давления, в центре тяжести которого находится точка приложения силы – центр давления.

Сила гидростатического давления на плоскую поверхность площадью ω находится аналитически по формуле

$$F = p_c \omega, \quad (12)$$

где $p_c = \rho g h_c$ – гидростатическое давление в центре тяжести площади ω .

Расстояние от свободной поверхности жидкости до точки приложения силы гидростатического давления (центра давления), измеренное в плоскости рассматриваемой фигуры площадью ω

$$z_d = z_c + I_0 / z_c \omega, \quad (13)$$

где z_c – расстояние от свободной поверхности до центра тяжести фигуры площадью ω , измеренное в плоскости фигуры; I_0 – момент инерции рассматриваемой плоской фигуры относительно горизонтальной оси, проходящей через ее центр тяжести.

При определении силы давления жидкости на криволинейную поверхность направление действия равнодействующей силы гидростатического давления неизвестно, поэтому определяют три ее составляющие: F_x , F_y , F_z . Для цилиндрической поверхности учитывают две составляющие F_x , F_z , так как $F_y = 0$. В этом случае равнодействующая сила гидростатического давления определяется

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}. \quad (14)$$

Горизонтальную составляющую F_x вычисляют как силу давления на плоскую поверхность, площадь которой ω_x равна площади проекции данной криволинейной поверхности на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси x

$$F_x = \rho g h_{cx} \omega_x, \quad (15)$$

здесь h_{cx} – глубина погружения центра тяжести площади ω_x .

Вертикальная составляющая силы

$$F_z = \gamma W, \quad (16)$$

где W – объем тела давления.

Тело давления – это объем, образованный снизу криволинейной поверхностью, сверху – свободной поверхностью или ее продолжением или пьезометрической плоскостью, а по бокам – вертикальными образующими, проходящими через ее крайние точки. Если над криволинейной поверхностью (в теле давления) находится жидкость, то это – действительный (положительный) объем, и сила давления жидкости направлена вниз. Если над криволинейной поверхностью нет свободной поверхности, ее надо продолжить и проектировать криволинейную поверхность на продолжение свободной поверхности, в объеме тела давления жидкости нет – получается фиктивный (отрицательный) объем тела давления (сила давления жидкости направлена вверх). Если при построении тела давления положительный объем полностью или частично накладывается на отрицательный, то эти части объемов взаимно уравниваются.

Выражение (16) для вертикальной силы представляет собой закон Архимеда, при этом F_z – подъемная (архимедова) сила; W – объем погруженного в жидкость тела. Соотношение силы тяжести тела и архимедовой силы определяет условия плавания или погружения тел в жидкости.

2.1 Определение давления в покоящейся жидкости

Пример 1. Определить вакуумметрическое давление в резервуаре A (рис. 1) по показаниям батарейного ртутного манометра: $h_1 = 160$ мм; $h_2 = 250$ мм; $h_3 = 120$ мм; $h_4 = 270$ мм; $h_5 = 180$ мм; $h_6 = 220$ мм. Температура $t = 20^\circ\text{C}$.

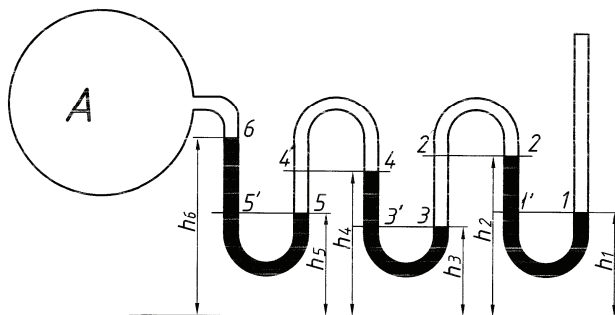


Рис. 1. Схема подключения батарейного ртутного манометра

Решение. Из условия равновесия находящихся в сообщающихся сосудах жидкостей следует, что давление p_1 в точке 1 равно давлению в p_1' точке 1'; аналогично $p_2 = p_2'$; $p_3 = p_3'$; $p_4 = p_4'$; $p_5 = p_5'$.

Так как в системе имеется вакуумметрическое давление, то чтобы избежать путаницы в знаках, в расчет вводим абсолютные давления. Определим абсолютные давления в точках: $p_1 = p_{ат}$. Абсолютное давление в точке 2 меньше, чем давление в точке 1 на величину весового давления столба ртути высотой $(h_2 - h_1)$: $p_2 = p_1 - \gamma_{рт}(h_2 - h_1)$. Давление в точке 3 больше, чем давление в точке 2 на величину давления столба воды высотой $(h_2 - h_3)$: $p_3 = p_2 + \gamma(h_2 - h_3) = p_1 - \gamma_{рт}(h_2 - h_1) + \gamma(h_2 - h_3)$.

Давление в точке 4 меньше давления в точке 3 на величину весового давления столба ртути высотой $(h_4 - h_3)$: $p_4 = p_3 - \gamma_{рт}(h_4 - h_3) = p_1 - \gamma_{рт}(h_2 - h_1) + \gamma(h_2 - h_3) - \gamma_{рт}(h_4 - h_3)$.

Давление в точке 5 больше давления в точке 4 на величину весового давления столба воды высотой $(h_4 - h_5)$: $p_5 = p_4 + \gamma(h_4 - h_5)$.

Давление в точке 6 меньше давления в точке 5 на величину весового давления столба ртути высотой $(h_6 - h_5)$: $p_6 = p_5 - \gamma_{рт}(h_6 - h_5) = p_1 - \gamma_{рт}(h_2 - h_1) + \gamma(h_2 - h_3) - \gamma_{рт}(h_4 - h_3) + \gamma(h_4 - h_5) - \gamma_{рт}(h_6 - h_5)$ и равно давлению в резервуаре.

С учетом выражения (11) и равенства $p_1 = p_{ат}$, после подстановки значений и проведения преобразований получим вакуумметрическое давление в резервуаре

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{рт}} - p_6 = \gamma_{\text{рт}}(h_2 - h_1 + h_4 - h_3 + h_6 - h_5) - \gamma(h_2 - h_3 + h_4 - h_5) = \\ = 132900(0,25 - 0,16 + 0,27 - 0,12 + 0,22 - 0,18) - 9800(0,25 - 0,12 + \\ + 0,27 - 0,18) = 35056 \text{ Па} = 0,35 \text{ ат}.$$

Значения удельного веса воды $\gamma = 9800 \text{ Н/м}^3$ и ртути $\gamma_{\text{рт}} = 132900 \text{ Н/м}^3$ взяты из табл. 1 прил.

Пример 2. Определить разность уровней ртути h в дифференциальном манометре, если разность давлений в точках A и B , находящихся на одном уровне в двух трубопроводах, наполненных водой, $p = 0,2 \text{ ат}$ (рис. 2). Температура воды $t = 20^\circ\text{C}$.

Решение. Согласно расположению точки 1 на нижнем уровне столба ртути и точки A давление в точке 1 (p_1) меньше давления в точке A на величину весового давления столба воды высотой $h_1/p_1 = p_A - \rho gh_1$. Давление на верхнем уровне столба ртути (p_2) находится аналогично: $p_2 = p_B - \rho gh_2$. Разность давлений в точках 1 и 2 равна весовому давлению столба ртути высотой $h/p_1 - p_2 = \rho_{\text{рт}}gh$. Так как $p_A - p_B = p_1 - p_2 + \rho g(h_1 - h_2)$ и $h_1 - h_2 = -h$, то

$$p_A - p_B = gh(\rho_{\text{рт}} - \rho).$$