Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

ГИДРАВЛИКА
(МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ)

**Методические указания и контрольные задания
к самостоятельной работе по направлению
подготовки бакалавров 270800 «Строительство»**

Составители: Г.Д. Слабожанин
Е.А. Иванова

Томск 2012

Гидравлика (механика жидкости): методические указания / Сост. Г.Д. Слабожанин, Е.А. Иванова. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 42 с.

Рецензент к.т.н. В.И. Мельков
Редактор Е.Ю. Глотова

Методические указания и контрольные задания к самостоятельной работе по дисциплине «Гидравлика (механика жидкости)» предназначены для подготовки бакалавров по направлению 270800 – «Строительство».

Печатаются по решению методического семинара кафедры теплогазоснабжения № 4 от 29.12.2011.

Утверждены и введены в действие проректором по учебной работе В.В. Дзюбо

с 01.09.2012
до 01.09.2017

Оригинал-макет подготовлен авторами.

Подписано в печать 20.06.12.
Формат 60×84. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 2, 31. Тираж 100 экз. Заказ № 380.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Гидравлика (механика жидкости) рассматривает основные законы равновесия и движения жидкостей и газов. Знание законов необходимо для решения многих технических вопросов строительного дела: расчет всевозможных трубопроводов (водопровод, воздуховод, газопровод), отопительных и вентиляционных устройств, водоотводных и дренажных сооружений.

Для усвоения курса гидравлики (механики жидкости) необходимо иметь знания об основных законах физики и теоретической механики, владеть методами математического анализа.

Самостоятельное изучение курса включает работу над книгой по программе дисциплины и выполнение двух контрольных работ в соответствии с нижеприведенными методическими указаниями.

Каждая контрольная работа содержит решение пяти задач, номера которых выбираются по буквам своей фамилии (повторяя ее при необходимости) согласно приведенной схеме (табл. 1). Если в группе есть однофамильцы, то последующий по списку выбирает задание по имени.

Таблица 1

	Номера задач				
	Задача 1 (по 1-й букве)	Задача 2 (по 2-й букве)	Задача 3 (по 3-й букве)	Задача 4 (по 4-й букве)	Задача 5 (по 5-й букве)
А Л Х	1	11	21	31	41
Б М Ц	2	12	22	32	42
В Н Ч	3	13	23	33	43
Г О Ш	4	14	24	34	44
Д П Щ	5	15	25	35	45
Ж Р Ь	6	16	26	36	46
Е С Ы	7	17	27	37	47
З Т Э	8	18	28	38	48
И У Ю	9	19	29	39	49
К Ф Я	10	20	30	40	50

1. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

1. *Введение в механику жидкости и газа.* Свойства жидкостей и газов: плотность, вязкость, тепловое расширение, сжимаемость, кипение. Понятие идеальной жидкости. Уравнение состояния газа.

2. *Гидростатика.* Гидростатическое давление, его свойства. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля. Сила давления на плоские и криволинейные стенки. Плавание тел. Закон Архимеда.

3. *Динамика жидкости.* Основные понятия: установившееся, неустановившееся, равномерное, неравномерное, плавноменяющееся движение. Линии тока. Элементарная струйка. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли, его геометрический и энергетический смысл. Коэффициент Кориолиса.

4. *Гидравлические сопротивления.* Режимы движения. Число Рейнольдса. Потери напора по длине. Местные потери. Основные расчетные формулы.

5. *Установившееся движение в напорных трубопроводах.* Виды трубопроводов. Расчет коротких, длинных труб. Последовательное, параллельное соединение трубопроводов. Гидравлический удар.

6. *Истечение жидкости из отверстий и насадков.* Истечение из малого отверстия. Коэффициенты сжатия, скорости, расхода. Истечение из цилиндрического насадка. Виды насадков, их характеристики.

7. *Установившееся движение в открытых руслах.* Равномерное движение. Основные расчетные формулы. Нормальная глубина. Расчет каналов с открытым и замкнутым поперечным сечением.

8. *Движение грунтовых вод.* Основной закон фильтрации. Ламинарная, турбулентная фильтрация. Уравнение фильтрационного потока. Кривая депрессии. Приток воды к водосборным колодцам и галереям.

2. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ. ГИДРОСТАТИКА

В данном разделе изучаются физические свойства, законы равновесия жидкостей и газов и методы применения этих законов для решения практических задач.

Следует изучить основные физические свойства жидкостей и газов, уяснить понятие давления, суть закона Паскаля. Изучить основное уравнение гидростатики и следствия этого уравнения. Необходимо также установить связь сил давления жидкости на плоские и криволинейные поверхности с силой Архимеда, научиться владеть понятиями центра масс, центра давления и тела давления и работать с ними.

2.1. Физические свойства жидкостей

Жидкостью называется физическое тело, обладающее текучестью, то есть большой подвижностью частиц относительно друг друга. Различают капельные (приобретающие форму капли при малых объемах) и газообразные (газы) жидкости. Основные физические характеристики жидкости – плотность, сжимаемость, температурное расширение, вязкость и поверхностное натяжение.

Плотность ρ – отношение массы m жидкости к ее объему W: $\rho = m/W$. С удельным весом жидкости γ (силой тяжести единицы объема) она связана через ускорение свободного падения g: $\gamma = \rho g$.

Сжимаемость – свойство жидкости уменьшать объем под действием давления. Она оценивается *коэффициентом сжимаемости* β_p, показывающим относительное уменьшение объема жидкости W при повышении давления p на единицу:

$$\beta_p = \frac{\Delta W}{W \cdot \Delta p} .$$

Температурное расширение – свойство жидкости изменять объем при нагревании – характеризуется *коэффициентом температурного расширения* β_T, равным относительному приращению объема жидкости W с изменением температуры Т на один градус при постоянном давлении: $\beta_T = \dfrac{\Delta W}{W \cdot \Delta T}$.

Плотность, сжимаемость и тепловое расширение газов могут быть оценены по уравнению состояния идеального газа

$$p = \rho R T, \qquad (2.1)$$

где p – абсолютное давление, Па; ρ – плотность газа, кг/м^3; R – газовая постоянная, например, для воздуха – R=287 Дж/(кг·К), для кислорода – R=260 Дж/(кг·К); Т – абсолютная температура, К.

Вязкость – свойство жидкости сопротивляться относительному скольжению ее слоев и частиц. Она оценивается *динамическим коэффициентом вязкости* μ, который измеряется в Паскаль-секундах (Па·с) и равен касательному напряжению: $\tau = \mu du/dx$ между соседними слоями, если их относительная скорость перемещения du численно совпадает с толщиной слоя dx. *Кинематический коэффициент вязкости* ν определяют из формулы: $\nu = \mu/\rho$ и измеряют квадратными метрами на секунду (м^2/с) или Стоксами (1Ст = 1см^2/с). Вязкость определяется видом жидкости, не зависит от скорости течения, но существенно изменяется с повышением температуры (уменьшается для капельных жидкостей и увеличивается для газов).

2.2. Гидростатическое давление

Гидростатика изучает законы равновесия жидкости и взаимодействие покоящейся жидкости с твердыми телами. *Гидростатическим давлением* называют нормальное сжимающее напряжение в неподвижной жидкости, то есть силу, действующую на единицу площади поверхности. За единицу измерения давления в международной системе принят Паскаль (Па = Н/м^2).

До сих пор часто используются техническая (ат) и физическая (атм) атмосферы, миллиметры ртутного и метры водяного столба: 1 ат = 1 кгс/см^2 = 98100 Па = 10 м вод. ст. = 735 мм рт. ст., 1 атм = 101325 Па = 760 мм рт ст.

Различают абсолютное, атмосферное, манометрическое и вакуумметрическое давления. *Абсолютное (полное) давление* p отсчитывается от абсолютного нуля (вакуума). *Атмосферное давление* $p_а$ создается силой тяжести воздуха атмосферы и принимается обычно равным 101325 Па или 760 мм рт. ст. Избыток абсолютного давления над атмосферным называют *манометрическим (избыточным) давлением,* $p_м = p_{изб} = p - p_а$, а недостаток до атмосферного давления – *вакуумметрическим давлением (вакуумом),* $p_в = p_а - p$. Приборы для измерения атмосферного давления назвали *барометрами*, манометрического – *манометрами*, вакуума – *вакуумметрами*.

Абсолютное давление p в любой точке покоящейся жидкости определяется по *основному уравнению гидростатики*

$$p = p_0 + \rho g h\,, \qquad (2.2)$$

где p_0 – абсолютное давление на свободной поверхности жидкости, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; h – глубина погружения точки под свободной поверхностью, м.

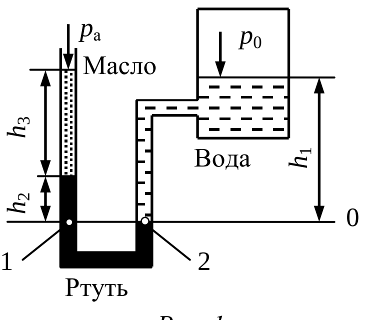


Рис. 1

Для решения задач, в которых рассматриваются системы с сообщающимися сосудами (баками, коленами, цилиндрами) целесообразно провести через них плоскость равного давления 0–0 (рис. 1).

Если система находится под действием только силы тяжести, то такая плоскость должна быть горизонтальной и пересекать только одну жидкость. Затем на этой плоскости в сосудах выделяют по одной точке 1 и 2, записывают выражения для абсолютного давления в этих точках

$$p_1 = p_а + \rho_м g h_3 + \rho_р g h_2\,, \quad p_2 = p_0 + \rho_в g h_1 \tag{2.3}$$

и, приравняв выражения между собой, определяют неизвестную величину. Здесь $\rho_м$, $\rho_р$, $\rho_в$ – соответственно плотности масла, ртути и воды.

2.3. Давление жидкости на плоские стенки

Найдем силу давления жидкости на плоскую стенку *AB*, перпендикулярную плоскости чертежа и наклоненную к горизонту под углом α (рис. 2). Атмосферное давление $p_а$ действует на стенку справа и слева (передается через жидкость). Поэтому силы от атмосферного давления взаимно компенсируются, и для расчета стенки на устойчивость и прочность достаточно определить только силу F от избыточного давления $p_{изб}$ жидкости на стенку. Она равна произведению избыточного давления $p_с$ в центре тяжести смоченной поверхности стенки на ее площадь ω:

$$F = p_с\omega = \rho g h_с \omega = \rho g \frac{H}{2}\frac{H}{\sin\alpha} b\,, \tag{2.4}$$

где $h_с$ – глубина погружения центра тяжести, м; H – толщина слоя жидкости в резервуаре, м; b – длина стенки (размер, перпендикулярный плоскости чертежа).

Если с другой стороны стенки также есть слой жидкости, то вычисляется сила давления жидкости со стороны этого слоя, а результирующая сила давления определится разностью сил от первого и второго слоев.

Точка D, через которую проходит вектор силы F, называ-

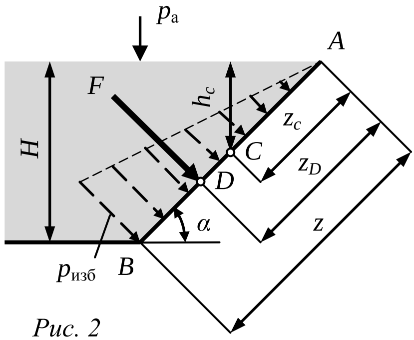


Рис. 2

ется *центром давления*. Избыточное давление в соответствии с уравнением (2.2) возрастает с глубиной $p_{изб} = \rho g h$ и имеет треугольную эпюру (рис. 2), поэтому центр давления D смещен в сторону наибольших давлений, то есть в общем случае находится ниже центра тяжести C. Координата z_D центра давления для стенки любой формы определяется по формуле

$$z_D = z_C + \frac{I_C}{z_C \omega}, \tag{2.5}$$

где z_C – координата центра тяжести смоченной поверхности стенки; I_C – момент инерции площади смоченной поверхности стенки относительно оси, проходящей через центр тяжести C, м^4. Для прямоугольной стенки, верхняя кромка которой совпадает со свободной поверхностью (рис. 2), $I_C = bz^3/12$; $\omega = bz$; $z_C = z/2$. Поэтому из формулы (2.5) получаем $z_D=2z/3$, то есть центр давления D находится от свободной поверхности на расстоянии $(2/3)z$ в плоскости стенки или на расстоянии по вертикали $(2/3)H$.

Для моментов инерции круга диаметра d: $I_C = \pi d^4/64$; для треугольника с основанием b и высотой h: $I_C = bh^3/36$, $z_C = 2h/3$.

2.4. Давление жидкости на криволинейные стенки

Сила F давления жидкости на криволинейную, например цилиндрическую, стенку AB с радиусом кривизны $r=H$ (рис. 3) определяется геометрической суммой горизонтальной $F_г$ и вертикальной $F_в$ составляющих:

$$F = \sqrt{F_г^2 + F_в^2}. \tag{2.6}$$

Горизонтальная составляющая равна силе давления на плоскую стенку, представляющую собой вертикальную проекцию OB криволинейной стенки

$$F_{\text{г}} = p_c\omega = \rho g h_c H b = \rho g \frac{H}{2} H b, \qquad (2.7)$$

где $p_{\text{с}}$ – давление в центре тяжести вертикальной проекции, Па; ω – площадь вертикальной проекции, м^2; b – длина цилиндрической стенки (размер, перпендикулярный плоскости чертежа), м.

Вертикальная составляющая равна силе тяжести тела давления. Тело давления – это фигура, которая всегда находится над криволинейной стенкой и ограничена самой стенкой, свободной поверхностью (мнимой или реальной) и вертикальными поверхностями, проходящими через границы криволинейной стенки. Для стенки *AB* (рис. 3) тело давления *OAB* представляет собой четверть цилиндра, и тогда вертикальная составляющая

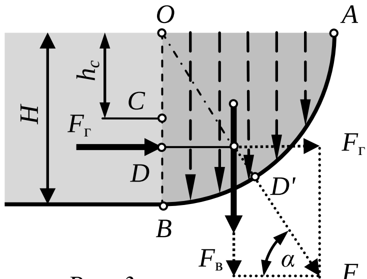


Рис. 3

$$F_{\text{в}} = \rho g W_{\text{тд}} = \rho g \frac{\pi H^2}{4} b, \qquad (2.8)$$

где $W_{\text{тд}}$ – объем тела давления, м^3.

В этом случае вертикальная составляющая $F_{\text{в}}$ направлена вниз, так как жидкость находится над стенкой и заполняет тело давления. Если жидкость располагается под криволинейной поверхностью (рис. 4), то вертикальная составляющая $F_{\text{в}}$ направлена снизу (от жидкости) вверх. Тело давления в этом случае ограничено мнимой (она получается продолжением реальной) свободной поверхностью и называется мнимым (фиктивным), так как не заполнено жидкостью.

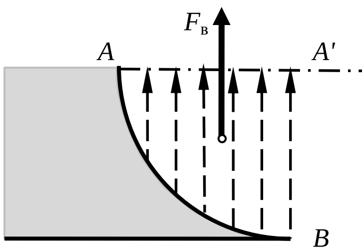


Рис. 4

Стенка может с глубиной изменять свой наклон, как, например, стенка на рис. 5. Тогда она разбивается на поверхности *AB* и *BC* с разным по знаку наклоном. И для них в отдельности строятся тела давления, которые действуют противоположно. После их суммирования получают результирующее тело давления *ABC*, сила тяжести которого равна вертикальной составляющей силы давления на поверхности *ABC*.

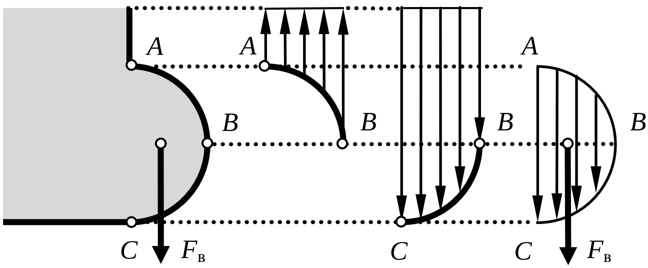


Рис. 5

Если жидкость находится по обе стороны криволинейной стенки, то также отдельно строятся тела давления от двух слоев жидкости и затем определяется их геометрическая сумма.

Линия действия равнодействующей силы давления на цилиндрические поверхности всегда направлена по радиусу и проходит через их геометрическую *ось O* (рис. 3). Угол наклона вектора этой силы к горизонту вычисляют по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg}(F_в / F_г)\,. \qquad (2.9)$$

3. ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ

В этом разделе следует изучить основные гидравлические параметры потока жидкости, виды и режимы ее движения. Необходимо знать математическое выражение основных законов классической физики – законов сохранения вещества и энергии – применительно к движению жидкостей и газов.

Решение многих практических задач основано на использовании уравнений Бернулли и неразрывности потока (сохранения расхода по длине трубы). Поэтому очень важным является изучение этих уравнений и следствий из них.

3.1. Уравнение постоянства расхода

Расходом называют массовое или объемное количество жидкости, протекающее через живое сечение потока в единицу времени. Между массовым M и объемным Q расходом существует связь $M = \rho Q$.

Уравнение постоянства расхода (его называют иногда уравнением неразрывности) выражает частный случай закона сохранения вещества и записывается так:

$$Q = V_1\omega_1 = V_2\omega_2 = \text{const}, \tag{3.1}$$

то есть расход не изменяется по длине потока и равен произведению средней скорости V потока на площадь живого сечения ω. Это уравнение справедливо для потоков несжимаемой жидкости и при отсутствии разрывов (газовых и паровых полостей) в жидкости.

3.2. Режимы движения жидкости

Различают два основных режима течения жидкости: *ламинарный* (слоистый) и *турбулентный* (вихревой).

При ламинарном режиме частицы жидкости движутся по параллельным траекториям без перемешивания, поэтому поток имеет слоистую структуру, то есть жидкость движется отдельными слоями.

Турбулентное движение характеризуется пульсацией давления и скоростей частиц, что вызывает интенсивное перемешивание жидкости в потоке, то есть вихревое движение.

Критерием режима течения является *число Рейнольдса*

$$\mathrm{Re} = Vd/\nu, \tag{3.2}$$

где V – средняя скорость потока, м/с; d – внутренний диаметр трубы, м; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м^2/с.

В случае течения жидкости по трубам некругового сечения при вычислении числа Рейнольдса по формуле (3.2) вместо диаметра трубы d используется гидравлический диаметр, определяемый соотношением

$$d_{\text{г}} = 4R_{\text{г}} = \frac{4\omega}{\chi},$$

где $R_{\text{г}}$ – гидравлический радиус, м; ω – площадь живого сечения, м^2; χ – смоченный периметр, м.

В инженерной практике режим определяют путем сравнения числа Рейнольдса Re с его критическим значением $\mathrm{Re}_{\text{кр}}$, соответствующим смене режимов движения жидкости.

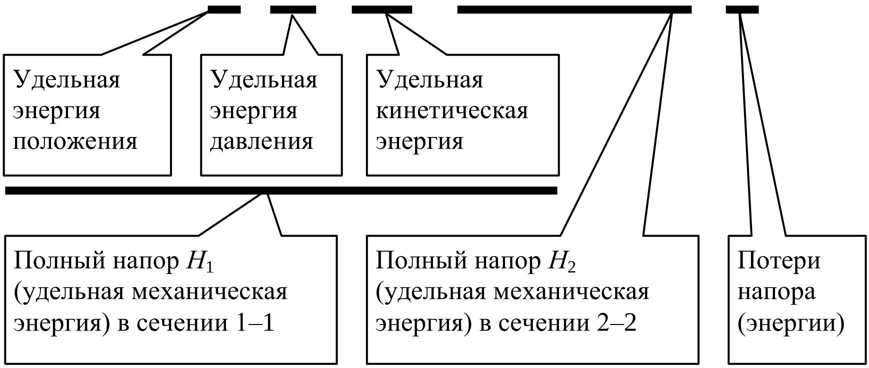
Для равномерных потоков жидкости в трубах (каналах) круглого сечения принимают $\mathrm{Re}_{\text{кр}}=2300$.

Из выражения (3.2) следует, что ламинарный режим реализуется при низких скоростях течения в каналах малого поперечного сечения (в порах грунта, капиллярах) или при движении жидкостей с большой вязкостью (нефть, масло, битумы). Турбулентный режим в природе и технике встречается чаще. Его закономерностям подчиняется движение воды в реках, ручьях, каналах, системах газоводоснабжения и водоотведения, а также течение бензина, керосина и других маловязких жидкостей в трубах.

3.3. Уравнение Бернулли

Уравнение Бернулли для установившегося потока реальной жидкости выражает закон сохранения энергии и имеет вид

$$\boxed{z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{\text{тр}}.} \qquad (3.3)$$



Здесь z – расстояние от произвольно выбранной горизонтальной плоскости отсчета 0–0 до любой точки рассматриваемого сечения потока (рис. 6), м; p – давление в выбранной точке сечения, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; α – коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса); для ламинарного течения α=2, для турбулентного обычно принимают α=1,1; V – средняя скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $h_{\text{тр}}$ – суммарные потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями 1–1 и 2–2, м.

Индексы указывают номер сечения, к которому относится величина. Сечения, связываемые уравнением, выбираются на участках с плавноизменяющимся движением жидкости, хотя между ними движение может быть и резкоизменяющимся.

Легко установить, что слагаемые уравнения (3.3) измеряются в единицах Дж/Н (энергия/сила) и поэтому выражают тот или иной вид удельной (отнесенной к весу – силе тяжести жидкости) энергии. Названия энергий указаны под уравнением. Механическую энергию единицы веса жидкости в гидравлике принято называть *напором*:

$z + p/(\rho g) = H_{\text{п}}$ – пьезометрическим,

$\alpha V^2/(2g) = H_к$ – скоростным,

$z + p/(\rho g) + \alpha V^2/(2g) = H$ – полным.

Из уравнения следует, что в случае отсутствия теплообмена потока с внешней средой *полная удельная энергия* (включая тепловую) *неизменна вдоль потока* и поэтому изменение одного вида энергии приводит к противоположному по знаку изменения другого. Таков *энергетический смысл* уравнения Бернулли.

Геометрический смысл уравнения (3.3) заключается в том, что его слагаемые могут быть измерены в единицах длины (Дж/Н = м) *геометрической* z, *пьезометрической* $p/(\rho g)$, *скоростной* $\alpha V^2/(2g)$ и *потерянной* $h_{тр}$ *высотами*, сумма которых для любого сечения есть величина постоянная. Измерение указанных высот простейшими приборами (мерной линейкой, пьезометром, трубкой Пито) и графическая иллюстрация уравнения Бернулли показаны на рис. 6.

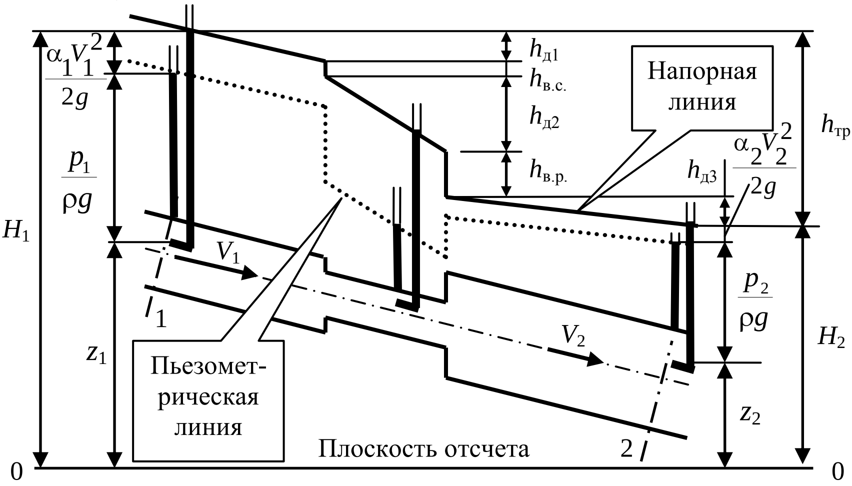


Рис. 6

Для большей наглядности рисунка каждая трубка Пито установлена в такой точке сечения потока, в которой кинетическая энергия $u^2/(2g)$ равна средней по сечению кинетической энергии $\alpha V^2/(2g)$. Поэтому для каждого сечения уровень жидкости в трубке Пито выше, чем в пьезометре, на величину скоростного напора $\alpha V^2/(2g)$.

Линия, соединяющая уровни жидкости в пьезометрах, называется *пьезометрической*. Она иллюстрирует изменение потенциальной энергии (пьезометрического напора $H_{п}$) по длине потока, так как расположена над плоскостью отсчета на расстоянии $z + p/(\rho g)$. Линия, проведенная через уровни жидкости в трубках Пито, отражает распределение полной удельной механической энергии (полного напора) вдоль потока и именуется *напорной*. Падение полного напора $\Delta H = h_{тр}$, приходящееся на единицу длины ℓ потока, называется *гидравлическим уклоном*

$$I = h_{тр}/\ell,$$

а величина

$$I_{п} = \Delta H_{п}/\ell$$

называется *пьезометрическим уклоном.*

Линии удельных энергий (напорная и пьезометрическая) дают наглядное представление о переходе одного вида энергии в другой по длине потока и позволяют при решении многих задач инженерной практики установить значения, причины и степень изменяемости основных параметров движения жидкости.

Линии удельных энергий строятся в соответствии с нижеприведенными правилами, вытекающими из уравнения Бернулли:

1. Напорная линия постоянно понижается по течению (если на рассматриваемом участке нет насоса) ввиду необратимого преобразования механической энергии в тепловую. Уклон линии (потери напора $h_{тр}$) тем больше, чем меньше сечение потока (рис. 6).

2. Пьезометрическая линия, в отличие от напорной, может не только понижаться, но и повышаться по течению. Это происходит при расширении потока (рис. 6) и объясняется уменьше-

нием скорости и кинетической энергии $\alpha V^2/(2g)$, часть которой в силу сохранения баланса переходит в потенциальную энергию $z + p/(\rho g)$. Другими словами, понижение скорости потока приводит к возрастанию давления по течению. Пьезометрическая линия проходит через центр тяжести выходного сечения канала (трубопровода) при истечении жидкости в атмосферу и ниже оси канала, если давление в нем меньше атмосферного.

3. Расстояние между напорной и пьезометрической линиями равно кинетической энергии, а поэтому обратно пропорционально диаметру сечения потока в четвертой степени. Для участков потоков постоянного сечения средние скорости одинаковы, поэтому линии удельных энергий параллельны между собой. Эти линии для потоков в конфузорных (конически сходящихся) патрубках расходятся, а в диффузорных (конически расходящихся) – сходятся. В баках и водоемах, где жидкость неподвижна, линии энергий совпадают со свободной поверхностью, если она находится под атмосферным давлением.

3.4. Истечение жидкости через отверстия и насадки

В гидравлике различают малые и большие отверстия. *Малым* называют *отверстие*, вертикальный размер которого существенно (более чем в 10 раз) меньше напора истечения. В этом случае скорость вытекающей струи по высоте отверстия можно считать одинаковой. Если струя касается только кромки отверстия, то стенку, в которой выполнено отверстие, в гидравлическом смысле называют *тонкой*. Такое истечение наблюдается при острой кромке либо при толщине стенки менее половины диаметра отверстия.

Струя на выходе из отверстия в тонкой стенке сжимается, достигая на некотором (около 0,5 диаметра отверстия) расстоянии наименьшего сечения, называемого *сжатым*. Явление сжатия объясняется свойством частиц жидкости, подходящих к отверстию с разных сторон, сохранять свое направление движения после прохождения отверстия. Степень сжатия струи оценивается *коэффициентом сжатия*

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega},$$

где ω_c, ω – площади сжатого сечения струи и отверстия, м^2.

Насадками называют патрубки длиной 3–4 диаметра, приставляемые к отверстию для увеличения расхода или придания струе особых свойств, например, дальнобойности.

При входе в цилиндрический насадок струя сначала сужается, отрываясь от стенок и образуя циркуляционную зону с пониженным давлением (ниже атмосферного в случае истечения в атмосферу), а затем постепенно расширяется и заполняет все сечение насадка.

Сжатия струи при выходе из насадка не происходит, поэтому коэффициент сжатия для выходного сечения насадка $\varepsilon = 1$.

В инженерной практике скорость V через отверстия и насадки определяют по формуле

$$V = \varphi\sqrt{2gH}, \tag{3.4}$$

где φ – коэффициент скорости, учитывающий снижение скорости за счет гидравлического сопротивления отверстия или насадка; H – напор истечения, м.

Расход Q через отверстия и насадки определяют по формуле

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH}, \tag{3.5}$$

где μ – коэффициент расхода, связанный с другими коэффициентами истечения соотношением $\mu = \varphi\varepsilon$, откуда видно, что μ учитывает снижение расхода, вызываемое гидравлическими сопротивлениями и сжатием струи; ω – площадь отверстия или выходного сечения насадка, м^2.

В общем случае коэффициенты истечения μ, φ, ε зависят от числа Рейнольдса, но при развитом турбулентном режиме истечения (при $Re>10^5$) численные значения коэффициентов становятся постоянными (табл. 2).

Таблица 2

Вид насадка	φ	ε	μ
Малое отверстие	0,97	0,62	0,60
Внешний цилиндрический насадок	0,82	1,0	0,82
Внутренний цилиндрический насадок	0,71	1,0	0,71
Конус расходящийся*, $\Theta = 8^o$	0,50	1,0	0,50
Конус сходящийся,* $\Theta = 13^o$	0,96	0,98	0,94
Коноидальный	0,97	1,0	0,97

*) коэффициенты отнесены к площади выходного сечения.

Сравнение указанных коэффициентов для отверстия и насадка показывает, что присоединение к отверстию внешнего цилиндрического насадка обеспечивает при развитом турбулентном режиме истечения увеличение расхода ($\mu_н>\mu$) примерно на 30 %.

При истечении жидкости под уровень (рис. 18) напор истечения H определяется разностью полных напоров до и после насадка (отверстия)

$$H = H_1 - H_2 = \left(\frac{p_1}{\rho g} + h_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + h_2\right), \qquad (3.6)$$

где p_1 и p_2 – абсолютные давления до и после насадка (отверстия), Па.

4. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

Основной задачей при расчете трубопроводов является определение полных потерь напора, состоящих из потерь напора на трение по длине и местных потерь. Для вычисления первых используется, как правило, формула Дарси–Вейсбаха, вторых – формула Вейсбаха. Подобным задачам нужно уделить самое пристальное внимание, так как они лежат в основе расчета отопительных, вентиляционных сетей, систем водоснабжения и теплогазоснабжения.

Следует также обратить внимание на методику определения повышения давления при гидравлическом ударе.

4.1. Потери напора на трение по длине

Нахождение потерь напора (потерь удельной механической энергии) при движении жидкостей составляет одну из основных задач практической гидравлики. В зависимости от потерь напора в гидросистемах назначаются диаметры трубопроводов, высота расположения баков, напор и мощность насосов.

Полные потери напора $h_{тр}$ на преодоление сил гидравлического трения при течении жидкости складываются из потерь напора по длине $h_д$ и местных потерь напора $h_м$:

$$h_{тр} = h_д + h_м. \tag{4.1}$$

Потери напора по длине вызваны тормозящим действием стенок, приводящим к вязкостному трению частиц и струек жидкости друг о друга вдоль трубопровода. Такие потери при равномерном течении пропорциональны длине потока и для круглых труб (каналов) определяются по формуле Дарси–Вейсбаха

$$h_{тр} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2g}, \tag{4.2}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, или коэффициент Дарси; ℓ, d – соответственно длина и внутренний диаметр трубы (канала), м; V – средняя скорость потока, м/с.

Коэффициент трения λ в общем случае зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости стенок трубы Δ/d, где Δ – средняя высота выступов шероховатости стенок, или абсолютная шероховатость.

При ламинарном режиме (при Re<2300) коэффициент трения вычисляется по теоретической формуле Пуазейля

$$\lambda = 64/\mathrm{Re}. \qquad (4.3)$$

Подставляя это выражение для λ в формулу (4.2) и расписывая число Рейнольдса $\mathrm{Re} = Vd/\nu$, получаем, что в ламинарном потоке потери напора по длине пропорциональны средней скорости в первой степени ($h_д \sim V$).

При турбулентном режиме течения различают области гидравлически гладких и шероховатых труб (стенок). Трубу или стенку считают *гидравлически гладкой*, если соблюдается условие $2300 \le \mathrm{Re} \le 10\,d/\Delta$. В этом случае прилегающий к стенке ламинарный подслой турбулентного потока покрывает выступы шероховатости, и поток не испытывает дополнительных завихрений от шероховатости. Поэтому в области гидравлически гладких труб, как в ламинарном режиме, λ зависит только от числа Рейнольдса и вычисляется по эмпирической формуле Блазиуса

$$\lambda = 0{,}316/\mathrm{Re}^{0,25}. \qquad (4.4)$$

Подставляя выражение для λ в формулу (4.2), легко показать, что в этой области $h_д \sim V^{1,75}$.

С увеличением числа Рейнольдса, например, за счет повышения скорости течения, толщина ламинарного подслоя турбулентного потока уменьшается, и при $\mathrm{Re} > 10d/\Delta$ выступы шероховатости оголяются. Они начинают вносить дополнительные возмущения (вихри) в турбулентное ядро потока, что приводит к возрастанию потерь напора; в этом случае труба (стенка) называется гидравлически шероховатой, а коэффициент трения определяется по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0{,}11(68/\mathrm{Re} + \Delta/d)^{0,25}. \qquad (4.5)$$

Формула указывает на увеличение коэффициента трения λ с возрастанием относительной шероховатости Δ/d стенок. При достаточно больших числах Рейнольдса $\mathrm{Re} \ge 500\Delta/d$ коэффициент λ не зависит от Re. Он зависит лишь от шероховатости Δ/d стенок и определяется по формуле Шифринсона $\lambda = 0{,}11(\Delta/d)^{0,25}$, а потери напора по длине становятся пропорциональными квадрату средней скорости $h_д \sim V^2$. Поэтому эту часть области шероховатых труб называют *зоной квадратичного сопротивления*.

Итак, для вычисления потерь напора по длине необходимо предварительно выявить область сопротивления (область ламинарного движения, область гладких или шероховатых стенок турбулентного движения), а затем определить коэффициент трения по соответствующим этим областям формулам.

4.2. Местные потери напора

Местные потери напора (механической энергии жидкости) возникают на коротких участках трубопровода с препятствиями для потока, называемыми местными сопротивлениями. К *местным гидравлическим сопротивлениям* относятся внезапное расширение и сужение труб, вентили, задвижки, клапаны, колена, решетки, сетки и другие элементы гидросистем, изменяющие конфигурацию стенок трубы или канала. Местные сопротивления вызывают изменение скорости движения жидкости по величине и направлению, что почти всегда приводит к отрыву потока (транзитной струи) от стенок и возвратному течению жидкости около них, то есть к образованию *циркуляционных зон*. Механическая энергия потока, поглощаемая циркуляционными зонами для создания и поддержания вращения жидкости, и составляет, в основном, местные потери напора.

В инженерных расчетах для определения местных потерь используется формула Вейсбаха, выражающая потери в долях от скоростного напора:

$$h_м = \xi \frac{V^2}{2g}, \qquad (4.6)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления; V – средняя скорость потока за местным сопротивлением, м/с.

При подсчете местных потерь напора используются справочные эмпирические значения ξ, которые зависят от геометрии местных сопротивлений и числа Рейнольдса Re.

В подавляющем большинстве случаев в местных сопротивлениях присутствует развитый турбулентный режим. При этом значения коэффициентов приобретают постоянные значения, не зависящие от числа Рейнольдса; для внезапного расширения $\xi_{\text{в.р}} = (\omega_2 / \omega_1 - 1)^2$; для внезапного сужения $\xi_{\text{в.с}} = 0{,}5(1 - \omega_2 / \omega_1)$; для колена с углом 90° $\xi_{\text{кол.}} = 0{,}051 + 0{,}19 d / R$. Здесь ω_1 – площадь сечения до сопротивления, м^2; ω_2 – площадь сечения после сопротивления, м^2; R – радиус закругления трубы, м.

4.3. Гидравлический расчет трубопроводов

Различают *простые* трубопроводы, имеющие постоянный по длине расход, и *сложные* – с ответвлениями. *Короткими* называют трубопроводы, в которых местные потери напора превышают 10 % от потерь напора по длине. В противном случае трубопроводы считаются *длинными*. При их расчете полные потери напора получают завышением потерь по длине на 5–10 %.

При истечении жидкости по простому короткому трубопроводу в атмосферу (рис. 7) уравнение Бернулли, записанное для сечения по свободной поверхности в баке и для выходного сечения, с некоторыми допущениями (α =1) принимает вид

$$H = \frac{V^2}{2g} + h_{\text{тр}}. \qquad (4.7)$$

При истечении в атмосферу действующий напор H равен сумме кинетической энергии $V^2/(2g)$ жидкости на выходе из трубопровода и полных потерь напора $h_{\text{тр}}$, то есть тратится на разгон жидкости до скорости V и преодоление гидравлических сопротивлений.

Расписывая $h_{тр}$ по формулам (4.1), (4.2), (4.6) с учетом выражения скорости $V = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2}$, из уравнения (4.7) получаем основную расчетную формулу

$$H = \frac{8Q^2}{\pi^2 g}\left[\frac{1}{d_{вых}^4} + \sum_i\left(\frac{\lambda_i L_i}{d_i^5}\right) + \sum_i\left(\frac{\xi_i}{d_i^4}\right)\right]. \tag{4.8}$$

Следует заметить, что при истечении *под уровень* (рис. 8) скорость жидкости на выходе (во втором баке) равна нулю, и весь действующий напор тратится только на преодоление гидравлических сопротивлений (H=$h_{тр}$), и в уравнении (4.8) в скобке исчезает первое слагаемое. Иногда, ввиду малости, им пренебрегают и при истечении в атмосферу.

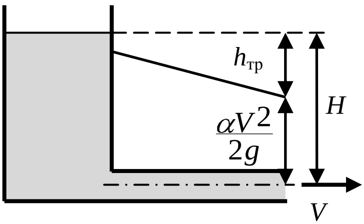


Рис. 7

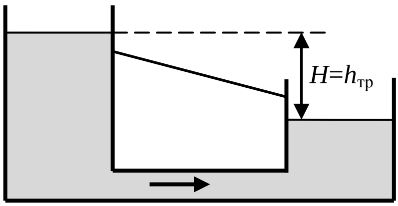


Рис. 8

Расчет трубопроводов по уравнению (4.8) сводится к *трем типовым задачам* по определению:

1 – напора H; 2 – расхода Q; 3 – диаметра d.

Задача *первого* типа решается прямым вычислением после определения числа Рейнольдса Re и коэффициентов λ и ξ.

Задача *второго* типа решается методом последовательных приближений или графоаналитически путем построения графика H=$H(Q)$, так как λ и ξ могут зависеть от числа Рейнольдса Re и, следовательно, от расхода Q.

Задача *третьего* типа решается методом подбора или графоаналитически путем построения кривой $d=d(H)$.

Задачи второго и третьего типов могут решаться прямым вычислением, как и первая, если справедливо допущение о квадратичности сопротивления, то есть когда λ и ξ не зависят от числа Рейнольдса Re и имеют постоянные значения.

4.4. Гидравлический удар

Гидравлическим ударом называется резкое изменение давления в трубопроводе при торможении или ускорении потока.

Наиболее опасным для гидросистем является *положительный* гидравлический удар, представляющий собой повышение давления в трубопроводе за счет торможения потока при быстром закрытии запорных устройств (задвижек, кранов, клапанов). Если время закрытия задвижки меньше фазы гидравлического удара $T=2\ell/c$ (время хода волны давления от задвижки до бака и обратно в трубопроводе длиной ℓ), то удар реализуется в полной мере и называется *полным*, а ударное повышение давления определяется по формуле Жуковского

$$\Delta p = \rho c V\,, \qquad (4.9)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; c – скорость распространения ударной волны в трубопроводе, м/с, близкая по своему значению к скорости распространения звука в неограниченном объеме жидкости (для воды в стальной трубе – 1000 м/с); V – средняя скорость жидкости в трубопроводе до закрытия задвижки, м/с.

Если время закрытия задвижки t больше фазы гидравлического удара T, то удар называется неполным и повышение давления определяется по формуле

$$\Delta p = \rho c V \frac{T}{t}\,. \qquad (4.10)$$

5. РАВНОМЕРНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

В этом разделе следует изучить методы расчета равномерного движения жидкости в открытых руслах замкнутого и незамкнутого поперечного сечения. Необходимо знать формулы для расчета скорости, расхода, коэффициента Шези в зависимости от геометрии канала, уметь определять параметры канала по заданному расходу.

5.1. Уравнение равномерного безнапорного течения

Движение жидкости в открытых руслах характеризуется наличием свободной поверхности, при этом смоченный периметр χ не включает часть периметра живого сечения ω по свободной поверхности.

Равномерное течение характеризуется постоянством средней скорости, площади и формы живого сечения потока, а следовательно, и неизменной глубиной и величиной смоченного периметра по длине потока.

Уравнение Бернулли для равномерного движения в открытом русле имеет вид

$$z_1 = z_2 + \lambda \frac{L}{4R_г} \frac{V^2}{2g},$$

где $R_г = \omega/\chi$ – гидравлический радиус. Разрешая это уравнение относительно скорости V, можно получить уравнение равномерного движения в открытом русле в виде

$$V = C\sqrt{R_г i} = W\sqrt{i}\,, \tag{5.1}$$

где $C = \sqrt{8g/\lambda}$ – коэффициент Шези, м^{0,5}/с; $i=(z_1–z_2)/l$ – геометрический уклон дна русла; $W = C\sqrt{R_г}$ – скоростная характеристика.

Для расхода жидкости имеем

$$Q = \omega V = \omega C\sqrt{R_г}\sqrt{i} = K\sqrt{i}\,, \qquad (5.2)$$

где $K = \omega C\sqrt{R_г}$ – расходная характеристика русла.

Наибольшее распространение для коэффициента Шези получила формула Маннинга

$$C = \frac{1}{n} R_г^{1/6}\,, \qquad (5.3)$$

где n – коэффициент шероховатости, зависящий от материала стенок русла, $R_г$ – гидравлический радиус, м.

Глубина потока при равномерном движении носит название нормальной глубины и обозначается h_0.

5.2. Трапецеидальные русла

Трапецеидальные русла – русла незамкнутого сечения, характеризуются следующими параметрами (рис. 9): глубина h; ширина по основанию b; коэффициент заложения откоса m=ctgα; площадь живого сечения $\omega = bh + mh^2$; смоченный периметр $\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2}$.

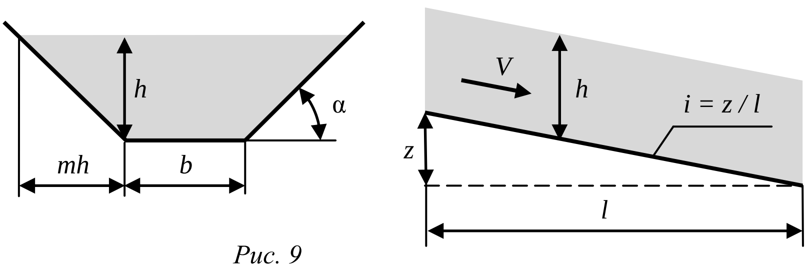


Рис. 9

При фиксированных значениях площади живого сечения ω, коэффициента m и уклона i расход в трапецеидальном русле зависит от соотношения между шириной b и глубиной h**.** Из формулы (5.2) следует, что максимальный расход Q достигается при максимальном $R_г$, который соответствует минимальному значению смоченного периметра. Минимизация χ при постоянном значении ω приводит к зависимости для относительной ширины канала $\beta_{гн}$, обеспечивающей максимальный расход канала, $\beta_{гн} = \dfrac{b}{h} = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$. (5.4)

Русло с такой геометрией носит название *гидравлически наивыгоднейшего русла*, при этом его гидравлический радиус $R_г=h/2$.

Наибольшая трудность в расчете трапецеидальных русл возникает при определении геометрии живого сечения при заданных остальных величинах (Q, i, m, n). В этом случае один из параметров b или h задается дополнительно либо определяется гидравлически наивыгоднейшее русло. Задача решается методом подбора, графическим методом с использованием специальных графиков или с применением компьютерных программ.

5.3. Круглые трубы

Безнапорные русла замкнутого сечения, в частности, круглые трубы также рассчитываются по формулам (5.2) – (5.4). Однако следует иметь в виду, что площадь живого сечения и смоченный периметр по мере роста *степени заполнения трубы* $a=h/r$ стремятся к своим максимальным значениям (рис. 10). В табл. 3 приведены основные относительные геометрические элементы живого сечения круглой трубы: площадь – $\omega'=\omega/r^2$; смоченный периметр – $\chi'=\chi/r$ и гидравлический радиус – $R_г'= R_г/r$.

Таблица 3

a	ω'	χ'	$R_г'$	a	ω'	χ'	$R_г'$
0,25	0,227	1,45	0,157	1,4	2,349	3,97	0,593
0,50	0,614	2,09	0,293	1,6	2,694	4,43	0,608
0,75	1,076	2,64	0,408	1,626	2,735	4,49	0,609
0,90	1,371	2,94	0,466	1,8	2,978	5,00	0,596
1,00	1,571	3,14	0,500	1,9	3,083	5,38	0,573
1,20	1,968	3,54	0,555	2,0	3,142	6,28	0,500

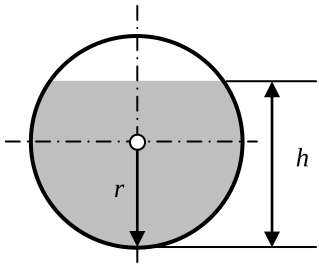


Рис. 10

При расчете труб дождевого водоотвода, дренажных труб допускается полное заполнение труб a = 2. Для отведения промышленных и бытовых стоков степень наполнения допускается в пределах a = 1,2–1,5.

6. ДВИЖЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

Уровень грунтовых вод существенным образом влияет на работу фундаментов зданий и сооружений.

В этом разделе следует изучить основные закономерности движения грунтовых вод и иметь понятия о скорости фильтрации, пористости среды, ламинарном и турбулентном режимах фильтрации, уравнении фильтрации, уравнении фильтрационного потока и уравнении кривой депрессии. Необходимо уметь рассчитывать водосборные колодцы и дренажные галереи.

6.1. Основные понятия

Движение грунтовых вод является частным случаем движения жидкости в пористой среде, называемым *фильтрацией.* Фильтрация происходит через поры грунта и может быть ограничена сверху и снизу водонепроницаемыми (водоупорными) слоями – *напорная фильтрация*. Если водоупор ограничивает поток только снизу, то такая фильтрация называется безнапорной. Поверхность фильтрационного потока называется *депрессионной* поверхностью, а кривая поверхности – депрессионной кривой.

Фильтрационным расходом Q называют объем жидкости, протекающей через рассматриваемое поперечное сечение пористой среды ω за единицу времени.

Скоростью фильтрации V называют отношение фильтрационного расхода к площади поперечного сечения пористой среды (всего фильтрующего слоя)

$$V = \frac{Q}{\omega}. \tag{6.1}$$

Пористостью p называют отношение объема пор $W_п$ ко всему объему W, занимаемому средой,

$$p = \frac{W_п}{W} \approx \frac{\omega_п}{\omega}. \tag{6.2}$$

Коэффициент пористости всегда меньше единицы.

Скорость фильтрационного потока V связана с истинной скоростью движения жидкости в порах u соотношением $V=up$**.**

Принято различать ламинарную и турбулентную фильтрацию. Режим фильтрации определяется значением числа Рейнольдса фильтрационного потока. По Павловскому,

$$\mathrm{Re}_ф = \frac{Vd_э}{\nu} \frac{1}{0{,}75p + 0{,}23}, \tag{6.3}$$

где $d_э$ – эффективный (средний) диаметр частиц пористой среды, м; ν – кинематический коэффициент вязкости, м^2/с.

Ламинарный режим реализуется при $\mathrm{Re}_ф < 9$, и описывается уравнением Дарси

$$V=kI, \; Q = \omega k I, \tag{6.4}$$

где k – коэффициент фильтрации, м/с; I – гидравлический уклон, соответствующий потере напора $h_{тр} = H_1 - H_2 = \Delta H$ при движении жидкости через грунт на длине $\Delta\ell$: $I = h_{тр} / \Delta\ell$.

Коэффициенты ламинарной фильтрации для ряда грунтов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Грунт	k, м/с	Грунт	k, м/с
Глина	0,00000001	Песок крупный	0,0003
Суглинок	0,000001	Гравий мелкий	0,0075
Песок глинистый	0,000015	Гравий	0,0325

При $10 < \mathrm{Re}_ф < 10000$ реализуется турбулентная фильтрация, описываемая уравнением

$$V = kI^m,\ Q = \omega k I^m. \tag{6.5}$$

Параметр m принимает значения от 1 до 0,5.

При $\mathrm{Re}_ф > 10000$ реализуется чисто турбулентный режим с уравнением

$$V = k_т \sqrt{I},\ Q = \omega k_т \sqrt{I}, \tag{6.6}$$

где $k_т$ – коэффициент турбулентной фильтрации, определяемый по формуле для крупнозернистых грунтов, м/с,

$$k_т = (2{,}0 - 0{,}014/d) p \sqrt{d}, \tag{6.7}$$

где d – диаметр частиц, м.

6.2. Уравнение фильтрационного потока

Гидродинамический напор H в сечении фильтрационного потока (рис. 11) записывается в виде

$$H = z + h, \tag{6.8}$$

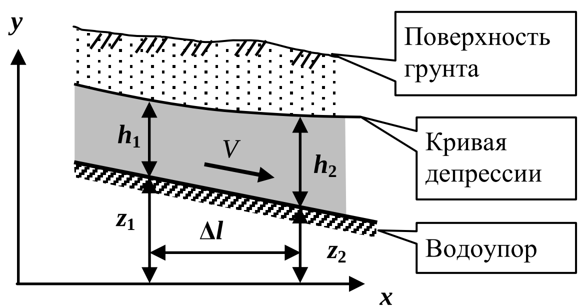


Рис. 11

где z – расстояние отметки дна потока от выбранной плоскости отсчета, м; h – пьезометрический напор – глубина фильтрационного потока, м.

Скоростным напором обычно пренебрегают ввиду его малости. Величина гидравлического уклона определяется соотношением

$$I = \frac{\Delta H}{\Delta \ell} = \frac{dH}{dx} = i - \frac{dh}{dx}, \qquad (6.9)$$

где $i = dz/dx$ – геометрический уклон водоупора, чаще всего принимаемый равным нулю, x – координата вдоль потока, м.

Уравнение ламинарного фильтрационного потока (6.4) примет вид

$$Q = \omega k\left(i - \frac{dh}{dx}\right). \qquad (6.10)$$

Для плоской задачи $\omega = bh$ (b – ширина потока), для цилиндрической симметрии $\omega = 2\pi rh$ (r – радиус).

6.3. Расчет притока воды к сооружениям

Грунтовый колодец. Расход воды (дебит) совершенного грунтового колодца (рис. 12) определяется формулой

$$Q = \frac{\pi k(H_0^2 - h_0^2)}{\ln(R/r_0)}, \qquad (6.11)$$

где H_0 – уровень воды в водоносном слое, м; h_0 – уровень воды в колодце в процессе откачки, м; R – радиус влияния колодца, м.

$$R = 3000(H_0 - h_0)\sqrt{k}.$$

Кривая депрессии описывается уравнением

$$\ln\frac{r}{r_0} = \frac{\pi k(h^2 - h_0^2)}{Q},$$

где r – текущая координата по радиусу, м; h – глубина потока, м.

Дренажный канал. Дебит дренажного канала (рис. 13) определяется формулой

$$Q = kb\left(\frac{H_0^2 - h_0^2}{L}\right), \qquad (6.12)$$

где L – ширина зоны влияния на понижения уровня грунтовых вод с каждой стороны от дренажного канала, м, определяется по формуле

$$L = \frac{H_0 - h_0}{I_{\text{ср}}},$$

где $I_{\text{ср}}$ – средний уклон кривой депрессии (табл. 5).

Таблица 5

Грунт	$I_{\text{ср}}$	Грунт	$I_{\text{ср}}$
Галька, песок кр.	0,003÷0,005	Глинистый	0,1
Песок	0,005÷0,015	Плотная глина	0,15
Песчано-глинистый	0,05÷0,1		

Кривая депрессии описывается уравнением

$$x = \frac{kb}{2Q}(h^2 - h_0^2).$$

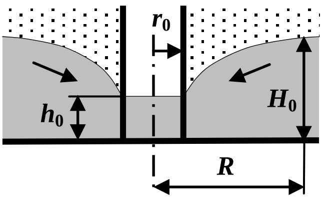


Рис. 12

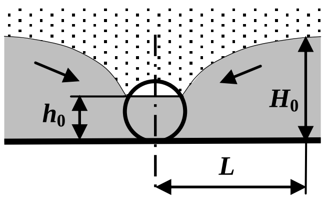


Рис. 13

7. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

7.1. Работа № 1

Задачи 1–10. Определить абсолютное $p_{A\text{абс}}$ и избыточное $p_{A\text{изб}}$ (или вакуумметрическое $p_{A\text{вак}}$) давление в точке A (рис. 14) и одну из пропущенных величин в табл. 6, если остальные величины заданы. Налитые в резервуары жидкости с плотностями ρ_1 и ρ_2 не смешиваются и находятся в состоянии покоя. Значение давления дано в атмосферах, принять атмосферное давление $p_\text{а}$ = 1атм = 101325Па.

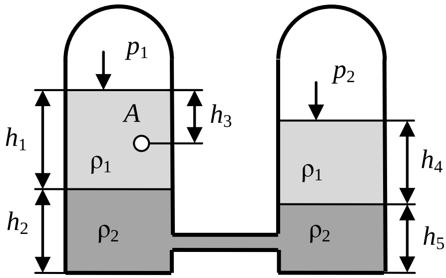


Рис. 14

Таблица 6

№ задачи	p_1, атм	p_2, атм	h_1, м	h_2, м	h_3, м	h_4, м	h_5, м	ρ_1, кг/м^3	ρ_2, кг/м^3
1	$p_\text{а}$	$p_\text{абс}$ = 1,3	3	?	2	4	1	800	1000
2	$p_\text{изб}$ = 0,2	$p_\text{а}$	?	4	7	2	8	1000	1200
3	$p_\text{абс}$ = 1,5	$p_\text{а}$	4	?	2	6	5	900	1000
4	$p_\text{абс}$ = 0,5	$p_\text{а}$	8	3	3	?	2	750	1000
5	?	$p_\text{а}$	4	3	1	2	3	700	1000
6	$p_\text{абс}$ = 0,3	?	6	2	3	4	2	900	1000
7	?	$p_\text{а}$	4	1	2	2	3	800	1100
9	$p_\text{изб}$ = 0,2	?	2	3	1	1	4	950	1200
9	$p_\text{изб}$ = 0,2	$p_\text{вак}$ = 0,1	4	3	6	?	4	750	900
10	$p_\text{абс}$ = 1,2	$p_\text{изб}$ = 0,3	?	3	1	2	2	1000	1200

Задачи 11–20. Определить по данным табл. 7 равнодействующую силу избыточного давления воды на плоский затвор (рис. 15), перекрывающий отверстие трубы. Определить координату точки приложения силы давления воды Z_D на указанную сторону затвора.

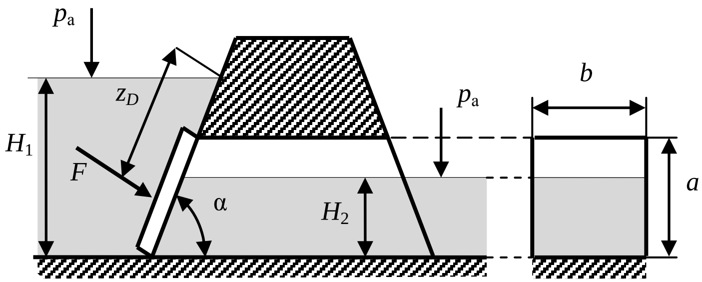


Рис. 15

Таблица 7

№ задачи	H_1, м	H_2, м	α, град	Форма сечения трубы	Размеры сечения трубы	Сторона затвора
11	5	1	90	Прямоугольник	a = 1,5; b = 1	Правая
12	5	2	45	то же	a = 1; b = 1	Левая
13	5	0	45	то же	a = 1,5; b = 1	Левая
14	4	0	60	— ″ —	a = 2; b = 1	Левая
15	5	0	90	Круг диаметра d	d = 1,5	Левая
16	4	1	90	то же	d = 2	Правая
17	4	3	90	то же	d = 2	Правая
18	4	2	90	— ″ —	d = 2	Правая
19	4	1	45	Треугольник	a = 2; b = 1	Правая
20	5	1	60	то же	a = 2; b = 2	Левая

Задачи 21–30. По данным табл. 8 и рис. 16 определить равнодействующую сил избыточного давления на 1 погонный метр (нормально к плоскости чертежа) указанной в таблице поверхности. Найти угол наклона линии действия сил избыточного давления воды на поверхность. В расчетах принять r = 1 м.

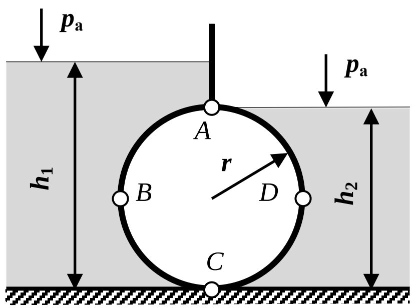


Рис. 16

Таблица 8

№ задачи	Поверхность	h_1, м	h_2, м	№ задачи	Поверхность	h_1, м	h_2, м
21	*ABC*	3	0	26	*BC*	3	1
22	*AB*	2	0	27	*BC*	1	0
23	*BC*	2	0	28	*BCД*	1	1
24	*ABC*	3	1	29	*CДА*	1	2
25	*AB*	3	1	30	*ДА*	0	2

Задачи 31–40. На напорном водоводе постоянного диаметра в водопроводных колодцах A и B, расположенных на расстоянии ℓ друг от друга, установлены манометры $М_A$ и $М_B$ (рис. 17), показывающие давление p_A и p_B. Гидравлический уклон равен I, пьезометрический $I_п$.

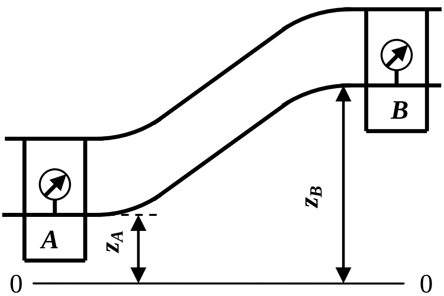


Рис. 17

Высота колодцев z_A и z_B. Пользуясь данными табл. 9, определите величины, отмеченные в ней знаком вопроса.

Таблица 9

№ задачи	z_A м	z_B м	p_A кПа	p_B кПа	ℓ км	I	$I_п$	Направление течения
31	43	50	510	500	1,1	?	–	?
32	62	80	380	250	2,1	–	?	?
33	110	120	470	400	1,8	?	–	?
34	115	120	416	?	1,5	–	0,002	От *A* к *B*
35	80	?	420	386	2	–	0,001	От *A* к *B*
36	23	10	?	400	0,5	–	0,002	От *B* к *A*
37	30	?	400	300	1,0	–	0,003	От *B* к *A*
38	87	50	200	350	2,2	?	–	?
39	95	110	500	?	1,5	–	0,001	От *A* к *B*
40	93	95	?	320	1,6	–	0,003	От *A* к *B*

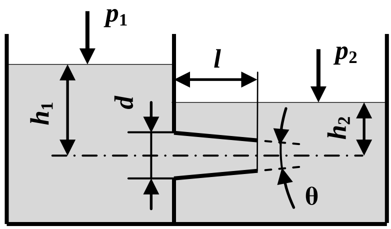


Рис. 18

Задачи 41–50. Определите расход воды, протекающей через насадок (рис. 18) по данным табл. 10. Во всех вариантах задан диаметр выходного сечения d = 30 мм. Значение давления дано в атмосферах, $p_а$ = 1атм = 101325Па.

Таблица 10

№ задачи	Тип насадка	h_1, м	h_2, м	θ,град	p_1, атм	p_2, атм
41	Цилиндр	2	6	0	$p_а$	$p_{изб}$ = 0,2
42	Цилиндр	6	–	0	$p_а$	$p_{абс}$ = 1,2
43	Цилиндр	7	–	0	$p_{вак}$ = 0,3	$p_а$
44	Цилиндр	2	8	0	$p_{изб}$ = 0,2	$p_а$
45	Цилиндр	9	2	0	$p_{изб}$ = 0,2	$p_а$
46	Сходящийся конус	10	2	13°	$p_а$	$p_а$
47	Сходящийся конус	16	–	13°	$p_а$	$p_{изб}$ = 0,7
48	Расходящийся конус	2	–	8°	$p_{абс}$=1,2	$p_а$
49	Расходящийся конус	9	5	8°	$p_а$	$p_а$
50	Расходящийся конус	12	–	8°	$p_а$	$p_{вак}$=0,2

7.2. Работа № 2

Задачи 1–10.

Определите направление течения и расход воды, проходящей по трубе (рис. 19) переменного сечения, используя данные табл. 11. Построить пьезометрическую и напорную линии. В расчетах принять коэффициент трения λ = 0,025, скоростным напором в баках пренебречь, принять радиус закругления $R = d_2$.

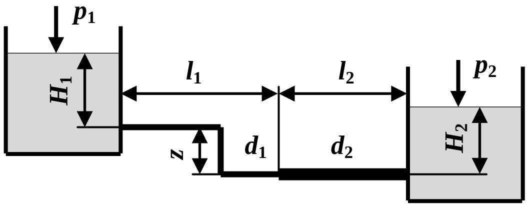


Рис. 19

Таблица 11

№ зад.	p_1 атм	p_2 атм	H_1 м	H_2 м	d_1 мм	d_2 мм	l_1 м	z м	l_2 м
1	$p_{абс}$ = 0,2	$p_{изб}$ = 1,1	10	3	75	100	200	1	200
2	$p_{изб}$ = 1,2	$p_а$	0	16	75	65	300	1	50
3	$p_{вак}$ = 0,3	$p_{абс}$ = 1,4	20	0	75	50	100	2	50
4	$p_{абс}$ = 1,8	$p_а$	4	–	100	75	200	8	50
5	$p_{вак}$ = 0,1	$p_а$	10	–	65	75	100	5	100
6	$p_{изб}$ = 2,0	$p_{вак}$ = 0,4	5	6	75	65	100	2	50
7	$p_{абс}$ = 1,2	$p_а$	0	20	100	75	200	3	50
8	$p_а$	$p_а$	0	15	60	100	150	1	100
9	$p_{вак}$ = 0,1	$p_а$	10	10	50	80	200	3	50
10	$p_а$	$p_{абс}$ = 1,6	22	0	75	50	100	2	50

Задачи 11–20. Подобрать диаметр стального трубопровода, если напор истечения H, длина трубы ℓ и расход воды Q (рис. 20). Коэффициент местного сопротивления на вход в трубу $\xi_{вх}$= 0,5, вентиля $\xi_в$= 4,5, гидравлический коэффициент трения λ = 0,025. Остальные данные – в табл. 12.

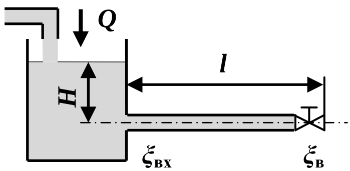


Рис. 20

Таблица 12

№ задачи	H, м	L, м	Q, м^3/с	№ задачи	H, м	L, м	Q, м^3/с
11	3	150	0,04	16	4	150	0,07
12	4	100	0,06	17	5	100	0,04
13	5	200	0,05	18	3	200	0,06
14	2,5	100	0,03	19	3,5	250	0,03
15	3	120	0,06	20	6	130	0,06

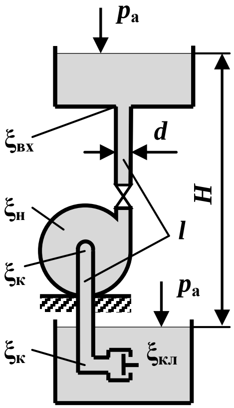


Рис. 21

Задачи 21–30. Насос подает воду на высоту H_0 по стальному трубопроводу, имеющему длину ℓ и диаметр d (рис. 21). Внезапно двигатель насоса отключается от сети, и вода под напором H_0 движется в обратном направлении. При закрытии обратного клапана ($\xi_{кл}$ = 3) возникает гидравлический удар. Коэффициент местного сопротивления насоса $\xi_н$=10, колена $\xi_к$= 0,15, гидравлический коэффициент трения λ = 0,08. Определить ударное повышение давления, время закрытия клапана одна секунда. Необходимые данные приведены в табл. 13.

Таблица 13

№ задачи	H_0, м	ℓ , м	d, мм	№ задачи	H_0, м	ℓ , м	d, мм
21	30	120	200	26	35	120	200
22	35	150	150	27	40	150	150
23	40	175	250	28	45	130	250
24	45	130	250	29	30	160	250
25	30	175	150	30	35	140	150

Задачи 31–40. Определить размеры канала для отвода стоков с расходом Q. Стенки канала облицованы бетоном с коэффициентом шероховатости n = 0,012. Уклон дна канала – i. Для канала трапецеидальной формы принять гидравлически наивы-

годнейшие размеры, для круглой трубы – коэффициент заполнения a = 1,5. Необходимые величины приведены в табл. 14.

Таблица 14

№ задачи	Тип канала	Q, м^3/с	m	i
31	Трапецеидальный	4,0	1,0	0,001
32	Круглый	4,5	–	0,0015
33	Трапецеидальный	5,0	1,5	0,002
34	Круглый	5,5	–	0,0025
35	Трапецеидальный	6,0	2,0	0,003
36	Круглый	5,5	–	0,0025
37	Трапецеидальный	5,0	1,25	0,002
38	Круглый	5,5	–	0,0015
39	Трапецеидальный	4,0	1,5	0,002
40	Круглый	5,0	–	0.001

Задачи 41–50. Для осушения песчано-глинистого грунта на строительной площадке устроены водосборные сооружения в виде водосборного колодца (рис. 12) и дренажного канала (рис. 13). Определить по данным табл. 15 зону влияния сооружения, его дебит и уровень понижения грунтовых вод на расстоянии 5 метров от сооружения. Длина дренажного канала b = 100 м.

Таблица 15

№ задачи	Вид сооружения	H_0, м	H_0, м	r_0, м
41	Водосборный колодец	4,0	0,5	0,15
42	Дренажный канал	4,5	0,2	–
43	Водосборный колодец	5,0	0,6	0,2
44	Дренажный канал	5,5	0,25	–
45	Водосборный колодец	6,0	0,8	0,15
46	Дренажный канал	5,5	0,3	–
47	Водосборный колодец	5,0	0,7	0,25
48	Дренажный канал	4,5	0,25	–
49	Водосборный колодец	4,0	0,4	0,2
50	Дренажный канал	3,0	0,25	–

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тужилкин, А.М. Примеры гидравлических расчетов / А.М. Тужилкин, В.М. Степанов, Е.К. Злобин. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 166 с.
2. Ухин, Б.В. Гидравлика / Б.В. Ухин. – М.: Форум ИНФРА-М, 2009. – 463 с.
3. Калицун, В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация / В.И. Калицун. – М.: Стройиздат, 2004. – 396 с.
4. Лапшев, Н.Н. Гидравлика / Н.Н. Лапшев. – М.: Академия, 2007. – 268 с.
5. Кудинов, В.А. Гидравлика / В.А. Кудинов. – М.: Высшая школа, 2007. – 198 с.
6. Метревели, В.Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями / В.Н. Метревели. – М.: Высшая школа, 2007. – 188 с.