

Министерство путей сообщения
Российской Федерации
Дальневосточный Государственный университет
путей сообщения

Кафедра «Гидравлика
и водоснабжение»

К. М. Ромм
Л. В. Козак
О.В. Акимов

Гидравлика

Задания и указания студентам безотрывных форм обучения
по выполнению контрольных работ
(техники, строительный цикл)

Хабаровск
2002

УДК 532.(075.8)
ББК Ж123
Р 702

Рецензент:

Профессор кафедры
«Гидравлика и водоснабжение»
Дальневосточного государственного университета путей сообщения
Г. И. Воловник

Ромм К. М., Козак Л. В., Акимов О. В.
Р 702 Гидравлика. Задания и указания студентам безотрывных форм обучения по выполнению контрольных работ (техники, строительный цикл). - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2002 - 31 с.: ил.

Задание на контрольную работу содержит набор задач по курсу «Гидравлика». Приводится теоретический материал и подробные методические указания по решению задач

Задание предназначено для студентов всех специальностей института транспортного строительства и предусматривает самостоятельное выполнение после изучения теоретического материала.

Рис. 14, прил. 7, список лит. - 9 назв.

УДК 532.(075.8)
ББК Ж123

© Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС), 2001

ВВЕДЕНИЕ

Данный курс является одним из основных теоретических дисциплин для специальностей 2903, 2908, 2909, 2911.

Успешное изучение учебной дисциплины в значительной степени зависит от интенсивности самостоятельной работы студентов. Именно поэтому при изучении курса важнейшее значение имеет контрольная расчетно-графическая работа. Она охватывает наиболее важные разделы курса и существенно облегчает его систематическое изучение. Практика показывает, что студенты самостоятельно и своевременно выполняющие контрольную работу, успешно сдают зачетную сессию.

Контрольная работа позволяет студентам выработать навыки применения теоретических сведений к решению конкретных задач технического характера и, тем самым, освоить практику гидравлических расчетов.

При изучении курса гидравлики студент должен выполнить контрольную работу, содержащую 7 задач, относящихся к различным разделам курса.

Таблица выбора задач

Специальность	Номера задач
ПГС	1,2,3,4,5,6,7
ВиВ	1,2,3,4,5,6,8
СЖД и МТ	1,2,3,4,5,6,9

Для каждой из задач в прил. 7 дано десять вариантов цифровых исходных данных. Номер варианта выбирается по последней цифре шифра студента.

Перед решением задач студент должен проработать соответствующий раздел курса по учебнику.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие условия:

1. Работу следует писать от руки чернилами на одной стороне листа. Это необходимо для рецензирования и исправлений. Страницы должны быть пронумерованы.

2. Решение задач вести поэтапно, с пояснением каждого хода решения.

3. Перед вычислением искомых величин следует вначале написать расчетную формулу в буквенном выражении, затем подставить численные значения всех входящих в нее параметров и привести окончательный ответ.

4. В приводимых расчетных формулах поясняются все входящие в них параметры.

5. У всех размерных величин должна быть проставлена размерность. Размерность всех величин должна быть выражена в Международной системе единиц СИ (ГОСТ 9867-61).

6. Значения всех коэффициентов следует обосновать ссылкой на таблицы, приведенные в тексте или в приложениях и указать номер источника по списку литературы.

7. Чертежи к работе, как правило, должны выполняться на миллиметровке и клеиваться или вшиваться в работу.

8. При построении расчетных графиков нужно указывать величины, откладываемые по осям графика, с обозначением их размерностей.

9. В конце работы привести описок литературы, которой пользовался студент в процессе выполнения работы, с указанием автора, названия, места и года издания.

10. Все отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены. Исправлять ошибки следует отдельно по каждой задаче на чистой стороне листа.

Работу, выполненную в соответствии с вышеуказанными требованиями, студент должен выслать в институт для проверки.

При решении задач следует строго следить за соблюдением единства размерностей величин, входящих в ту или иную расчетную зависимость. Как показывает практика рецензирования контрольных работ, несоблюдение единства размерностей является одной из наиболее частых ошибок, допускаемых студентами-заочниками, которое приводит к грубому искажению получаемой расчетной величины и всего результата в целом.

Работа может быть зачтена только в том случае, если она не содержит принципиальных и грубых арифметических ошибок. Арифметические ошибки, вызванные несоблюдением единства размерностей или какой-либо небрежностью при расчетах, будут оценены наравне с принципиальными ошибками методического характера.

К зачёту по теории гидравлики студента допускают, только после получения им зачета, как по контрольной работе, так и по лабораторным работам, которые он должен выполнить и защитить в лаборатории института. При сдаче зачёта нужно предъявить экзаменатору свои зачетные контрольные работы и дополнительно их защитить.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

ЗАДАЧА 1

Участок трубопровода заполнен водой при атмосферном давлении. Требуется определить повышение давления в трубопроводе при нагреве воды на Δt °С и закрытых задвижках на концах участка.

Примечание. Коэффициенты температурного расширения и объемного сжатия принять $\beta_t = 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $\beta_w = 5 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$

Указания к решению задачи 1

При решении задачи необходимо воспользоваться коэффициентами объемного сжатия β_w и температурного расширения β_t .

$$\beta_w = \frac{\Delta W}{W_{H1} \cdot \Delta P}; \quad \beta_t = \frac{\Delta W}{W_H \cdot \Delta t} \quad (1)$$

где DW – изменение начального объема W_H , соответствующее изменению давления на величину Dp или температуры на величину Dt ; W_H – начальный объем, занимаемый жидкостью, до ее нагрева; W_{H1} – начальный объем, занимаемый жидкостью при атмосферном давлении после ее нагрева.

Из этих формул находим искомую величину Dp при изменении температуры на заданную величину Dt °С.

ЗАДАЧА 2

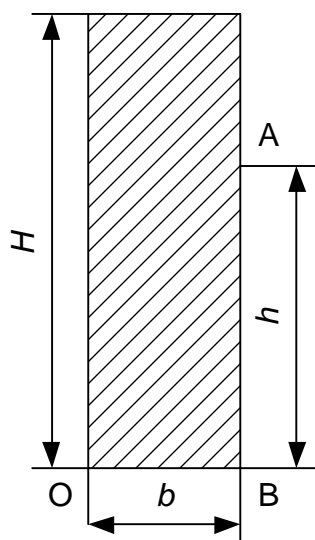


Рис. 1.

Подпорная стенка прямоугольной формы имеет высоту H , ширину b (рис. 1), плотность кладки $\rho_{кл}$. Глубина воды перед стенкой h , плотность воды $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$; ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Требуется определить:

1. Силу избыточного гидростатического давления на 1 погонный метр длины стенки, предварительно построив эпюру гидростатического давления.
2. Положение центра давления.
3. Запас устойчивости K подпорной стенки на опрокидывание.

4. Ширину стенки b_3 при запасе устойчивости $K = 3$.

Указания к решению задачи 2

Для построения эпюры гидростатического давления на стенку следует в точках А и В определить избыточное давление по формуле:

$$p_{изб} = \rho_e \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

где h – глубина погружения данной точки под уровень воды, м.

При построении эпюры гидростатического давления следует помнить, что давление всегда направленно перпендикулярно площадке, на которую оно действует.

Сила избыточного гидростатического давления на плоскую стенку вычисляется по формуле:

$$P_{изб} = p_{ц.м.} \cdot \omega, \quad (3)$$

где $p_{ц.м.}$ – давление в центре тяжести смоченной поверхности, Па (Н/м^2); ω – площадь смоченной поверхности, м^2 .

Точка приложения суммарной силы избыточного гидростатического давления называется центром давления. Положение центра давления определяется по формуле:

$$L_{ц.д.} = L_{ц.м.} + \frac{J}{L_{ц.м.} \cdot \omega}, \quad (4)$$

где $L_{ц.д.}$ – расстояние в плоской стенке от центра давления до свободного уровня жидкости, м; $L_{ц.м.}$ – расстояние в плоской стенке от центра тяжести стенки до свободного уровня жидкости, м; ω – площадь смоченной поверхности, м; J – момент инерции смоченной плоской площадки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести. Для плоской прямоугольной фигуры:

$$J = L \cdot h^3 / 12, \quad L = 1, \text{ пог. м}$$

Определив силу избыточного гидростатического давления $P_{изб}$ и точку ее приложения $L_{ц.д.}$, можно найти опрокидывающий момент $M_{опр} = P_{изб} \cdot (h - L_{ц.д.})$.

Удерживающий момент относительно точки О равен:

$$M_{уд} = G \cdot \frac{b}{2}, \quad (5)$$

где G – вес подпорной стенки, кН.

Запас устойчивости на опрокидывание равен отношению удерживающего момента сил относительно точки О к опрокидывающему моменту:

$$K = \frac{M_{уд}}{M_{опр}}. \quad (6)$$

Если значение K получится меньше трех, то следует определить ширину стенки b_3 , которая бы удовлетворяла запасу устойчивости $K = 3$. Полученное значение округлить до 5 сантиметров в большую сторону.

ЗАДАЧА 3

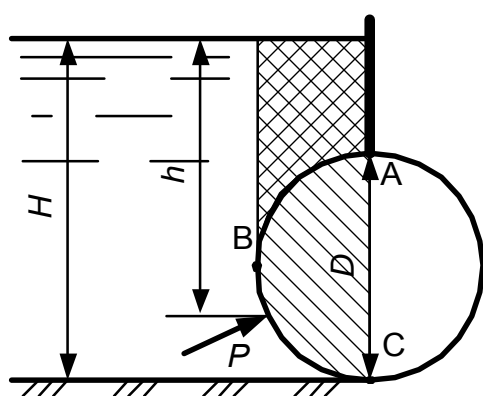


Рис. 2.

Определить величину, направление и точку приложения силы гидростатического давления воды на 1 метр ширины вальцового затвора диаметром D , если уровень воды перед затвором H (рис. 2). Плотность воды 1000 кг/м^3 , ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$.

Указания к решению задачи 3

Суммарная сила избыточного давления воды на цилиндрическую поверхность определяется по формуле:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \quad (7)$$

где P_x – горизонтальная составляющая силы избыточного гидростатического давления, Н; P_y – вертикальная составляющая силы избыточного гидростатического давления, Н.

Горизонтальная составляющая силы избыточного гидростатического давления равна силе давления на вертикальную проекцию цилиндрической поверхности:

$$P_x = \rho_e \cdot g \cdot h_{ц.м.} \cdot \omega_y, \quad (8)$$

где $h_{ц.м.}$ – расстояние по вертикали от центра тяжести вертикальной проекции цилиндрической поверхности до уровня воды, м; ω_y – площадь вертикальной проекции цилиндрической поверхности, м^2 .

Вертикальная составляющая силы избыточного гидростатического давления определяется по формуле:

$$P_y = \rho_e \cdot g \cdot W, \quad (9)$$

где W – объем тела давления, м^3 .

То есть вертикальная составляющая силы давления равна весу жидкости в объеме тела давления.

Тело давления представляет собой объем, расположенный над цилиндрической поверхностью и заключенный между вертикальными плоскостями, проходящими через крайние образующие цилиндрической поверхности, самой цилиндрической поверхностью и свободной поверхностью воды. Если тело давления находится со стороны, не смачиваемой жидкостью поверхности (в теле давления нет воды), то такое тело давления отрицательно и сила P_y будет направлена вверх.

В данной задаче для нахождения тела давления следует цилиндрическую поверхность ABC разделить на две: AB и BC, причем тело давления для поверхности AB будет положительным, а для BC – отрицательным.

Результирующий объем тела давления на всю цилиндрическую поверхность ABC и его знак находятся путем алгебраического суммирования тел давления на криволинейные поверхности AB и BC.

Суммарная сила избыточного гидростатического давления на цилиндрическую поверхность направлена по радиусу к центру цилиндрической поверхности под углом φ к вертикали: $\operatorname{tg}\varphi = \frac{P_x}{P_y}$. Расстояние h от

свободной поверхности воды до точки приложения силы округлить до сантиметра.

ЗАДАЧА 4

Из открытого резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному трубопроводу (эквивалентная шероховатость $k_э = 0,1$ мм), состоящему из труб различного диаметра d и различной длины L , вытекает в атмосферу вода, расход которой Q и температура t °C (рис. 3-7).

Требуется:

1. Определить скорости движения воды и потери напора (по длине и местные) на каждом участке трубопровода.
2. Установить величину напора H в резервуаре.
3. Построить напорную и пьезометрическую линии, с соблюдением масштаба.

Указания к решению задачи 4

Эта задача решается на основе применения уравнения Д. Бернулли. Для плавно изменяющегося потока вязкой жидкости, движущейся от се-

чения 1 к сечению 2, уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_{1-2}, \quad (10)$$

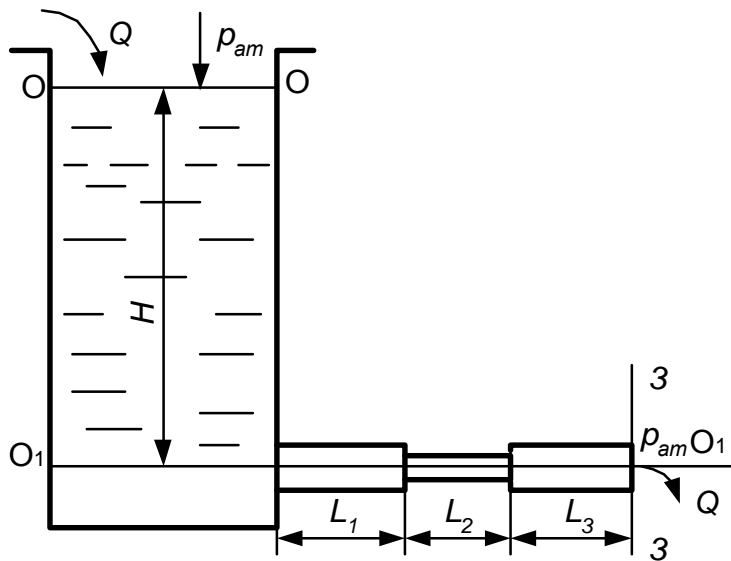


Рис. 3.

где Z_1, Z_2 – расстояние от центров тяжести сечений 1 и 2 до произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения; p_1, p_2 – давление в центрах тяжести живых сечений 1 и 2; V_1, V_2 – средняя скорость движения жидкости в живых сечениях 1 и 2; α_1, α_2 – коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса) – поправочный коэффициент, представляющий собой

безразмерную величину, равную отношению истинной кинетической энергии потока в рассматриваемом сечении к кинетической энергии, подсчитанной по средней скорости. Для ламинарного режима движения $\alpha = 2$, а для турбулентного α можно принять равным 1; h_{1-2} – потери напора на преодоление сил сопротивления при движении потока от сечения 1 до сечения 2; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

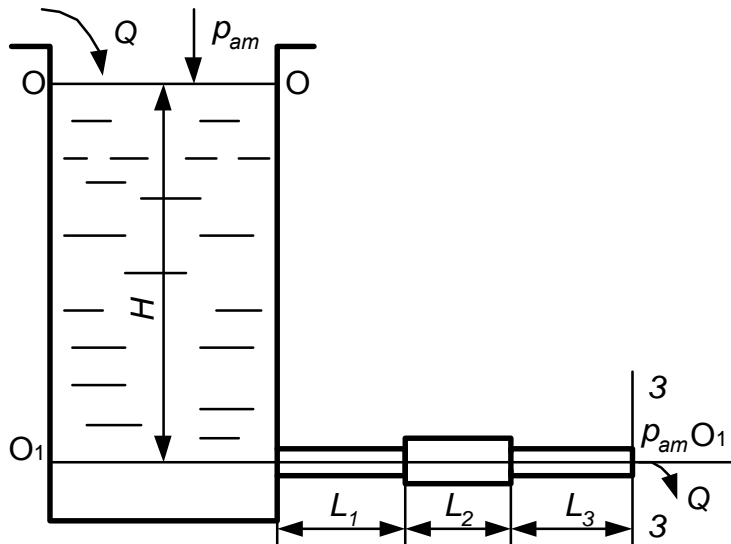


Рис. 4.

Решение задачи выполняется в следующем порядке:

1. Составляется уравнение Д. Бернулли в общем виде для сечений 0-0 (на свободной поверхности жидкости в резервуаре) и сечения 3-3 (на выходе потока из трубы). При написании уравнения Д. Бернулли следует помнить, что индексы у всех членов уравнения должны соответствовать номерам рассматриваемых сечений.

Например, величины, относящиеся к сечению 0-0, следует обозначать Z_0, p_0, α_0, V_0 , а к сечению 3-3 – Z_3, p_3, α_3, V_3 .

2. Намечается горизонтальная плоскость сравнения. При горизонтальном трубопроводе плоскость сравнения проводится по оси трубопровода. После этого устанавливается, чему равно каждое слагаемое, входящее в уравнение Д. Бернулли, применительно к условиям решаемой задачи. Например, $Z_0 = H$ (искомая величина на-

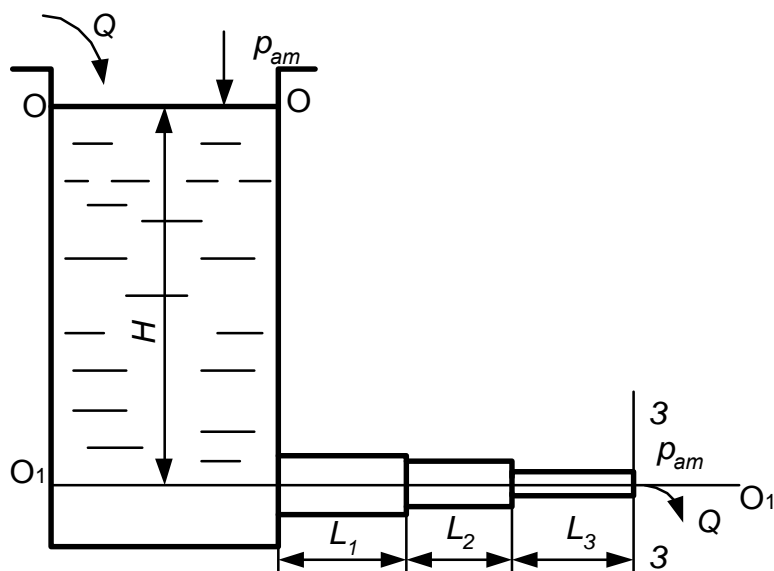


Рис. 5.

пора в резервуаре); $p_0 = p_{am}$ (атмосферное давление); $V_0 = 0$ (скорость движения воды в сечении 0-0) и так далее.

3. После подстановки всех найденных величин в уравнение Д. Бернулли и его преобразования записывается расчетное уравнение в буквенном выражении для определения искомой величины H .

4. Определяются скорости движения воды на каждом участке.

5. По скоростям движения воды вычисляются числа Рейнольдса, и устанавливается режим движения на каждом участке. Значение кинематического коэффициента вязкости ν определяют по прил. 1 в зависимости от температуры.

6. Определяются потери напора по длине каждого участка (h_{L1} , h_{L2} , h_{L3}) и в каждом местном сопротивлении (вход воды из резервуара $h_{вх}$, внезапное расширение $h_{ер}$ и внезапное сужение $h_{ес}$).

7. Потери напора по длине следует определять по формуле Дарси:

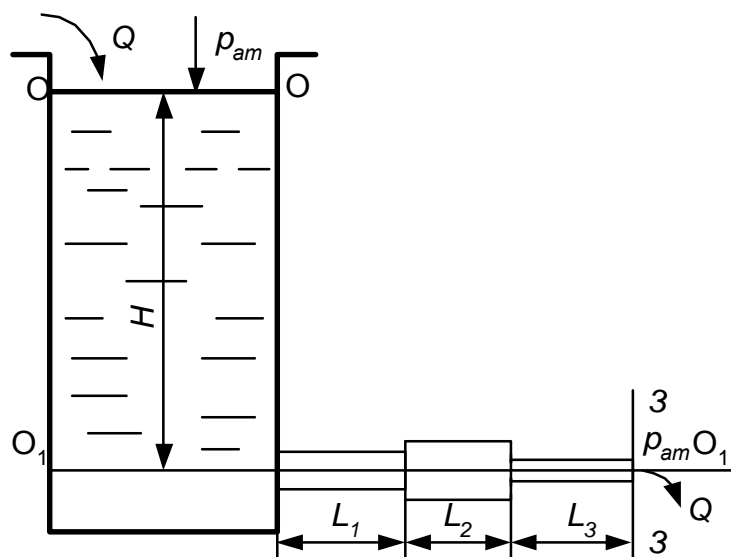


Рис. 6.

$$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (11)$$

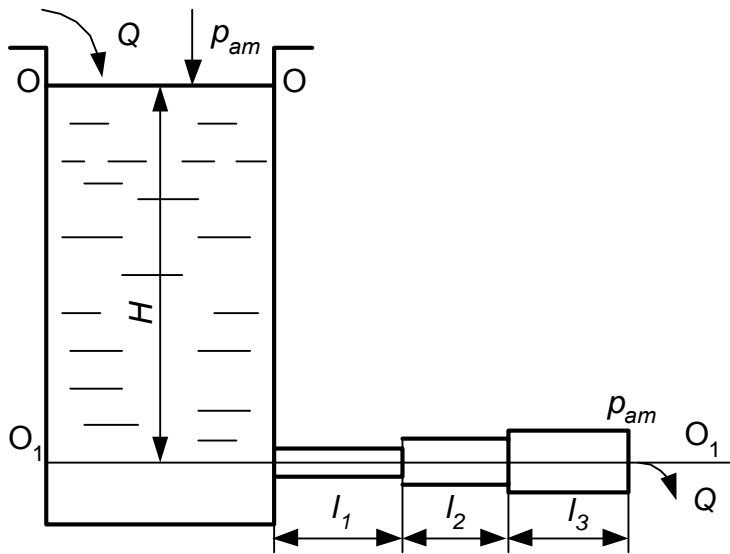


Рис. 7.

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); L , d – соответственно длина и диаметр расчетного участка трубопровода; V – средняя скорость движения воды на рассматриваемом участке.

8. Коэффициент λ может быть определен по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_э}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

где $k_э$ – эквивалентная шероховатость стенки трубы;

9. Потери напора в местных сопротивлениях вычисляются по формуле Вейсбаха:

$$h_M = \zeta \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (13)$$

где V – средняя скорость за данным местным сопротивлением; ζ – безразмерный коэффициент местного сопротивления определяется по справочнику.

При вычислении потери напора на вход в трубу коэффициент местного сопротивления $\zeta_{вх}$ равен 0,5. Значение коэффициента местного сопротивления при внезапном сужении трубопровода $\zeta_{сж}$ берется в зависимости от степени сужения n (отношения площади трубы в узком сечении к площади трубы в широком сечении) по прил. 2.

Потерю напора при внезапном расширении трубопровода можно определить по формуле Борда:

$$h_{вр} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot g}, \quad (14)$$

где V_1 и V_2 – средние скорости течения до и после расширения.

10. После определения потерь напора по длине и в местных сопротивлениях вычисляется искомая величина – напор H в резервуаре.

$$H = \frac{\alpha_3 \cdot v_3^2}{2 \cdot g} + \sum h_L + \sum h_M. \quad (15)$$

11. Строится напорная линия. Напорная линия показывает, как изменяется полный напор: (полная удельная энергия) по длине потока. Значения H откладываются вертикально вверх от осевой линии трубопровода.

При построении напорной линии нужно вертикалями выделить расчетные участки. Таких участков в данной задаче будет три. Далее в произвольно выбранном вертикальном масштабе откладывается от осевой линии величина найденного уровня жидкости в резервуаре H . Проводя по этому уровню горизонтальную линию, получаем линию исходного (первоначального) напора. От уровня жидкости в резервуаре по вертикали, отвечающей сечению при входе жидкости в трубопровод, откладывается в масштабе вниз отрезок, равный потере напора при входе жидкости в трубу (потеря напора в местном сопротивлении h_{ex}). На участке L_1 имеет место потеря напора по длине трубопровода h_{L1} . Для получения точки, принадлежащей напорной линии в конце участка L_1 , нужно от линии полного напора после входа жидкости в трубу отложить по вертикали в конце участка L_1 вниз в масштабе отрезок, соответствующий потере напора на этом участке h_{L1} . Затем от точки полного напора в конце участка L_1 откладывается в масштабе отрезок, соответствующий потере напора в местном сопротивлении (внезапное расширение h_{ep}), и так до конца трубопровода. Соединяя точки полного напора в каждом сечении, получим напорную линию.

Пьезометрическая линия показывает, как изменяется пьезометрический напор (удельная потенциальная энергия), по длине потока. Удельная потенциальная энергия меньше полной удельной энергии на величину удельной кинетической энергии $\alpha v^2 / (2g)$. Поэтому, чтобы построить пьезометрическую линию, нужно вычислить на каждом участке величину $\alpha v^2 / (2g)$ в начале и в конце каждого участка и соединяя полученные точки, строим пьезометрическую линию.

Графики напорной и пьезометрической линий будут построены правильно в том случае, если при их построении были выдержаны принятые вертикальный и горизонтальный масштабы, а также верно вычислены все потери напора и все скоростные напоры $\alpha v^2 / (2g)$.

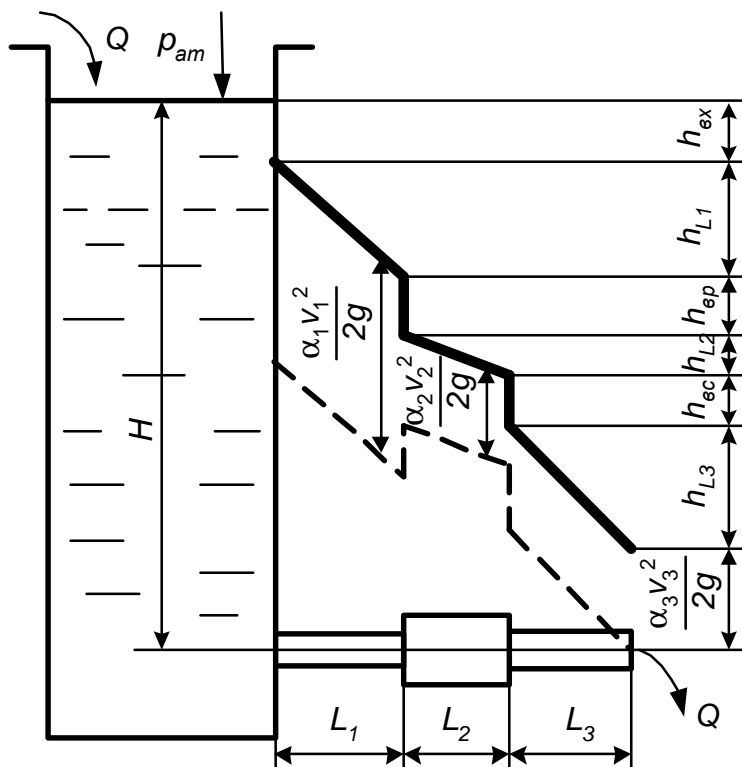


Рис. 8.

Для того чтобы проверить правильность построения напорной и пьезометрической линий, необходимо помнить следующее:

1. Напорная линия вниз по течению всегда убывает. Нигде и никогда напорная линия не может вниз по течению возрастать.

2. Поскольку потеря энергии потока на трение зависит от скорости движения жидкости, интенсивность потери напора (потеря напора на единицу длины или гидравлический уклон) будет больше на том участке, где скорость больше. Следовательно, на участках с меньшими диаметрами и

большими скоростями наклон напорной и пьезометрической линии будет больше.

3. В отличие от напорной пьезометрическая линия может вниз по течению как убывать, так и возрастать (при переходе с меньшего сечения на большее).

4. В пределах каждого участка пьезометрическая линия должна быть параллельна напорной, поскольку в пределах каждого участка постоянна величина $\alpha v^2 / (2g)$.

5. На тех участках, где скорость больше, расстояние между напорной и пьезометрической линиями больше.

6. Как бы ни изменялась пьезометрическая линия по длине потока при выходе его в атмосферу (свободное истечение), она неизбежно должна приходиться в центр тяжести выходного сечения. Это происходит потому, что пьезометрическая линия показывает изменение избыточного давления по длине трубопровода, которое в выходном сечении равно нулю, поскольку в выходном сечении абсолютное давление равно атмосферному.

После построения напорной и пьезометрической линий на графике показывают все потери напора и все скоростные напоры с указанием их численных значений. Примерный вид графика приведен на рис. 8.

ЗАДАЧА 5

Вода из реки по самотечному трубопроводу длиной L и диаметром d подается в водоприемный колодец, из которого насосом с расходом Q она перекачивается в водонапорную башню. Диаметр всасывающей линии насоса – $d_{вс}$, длина – $L_{вс}$. Ось насоса расположена выше уровня воды в колодце на величину H (рис. 9).

Требуется определить:

1. Давление при входе в насос (показание вакуумметра в сечении 2-2), выраженное в метрах водяного столба.
2. Как изменится величина вакуума в этом сечении, если воду в колодец подавать по двум трубам одинакового диаметра d ?

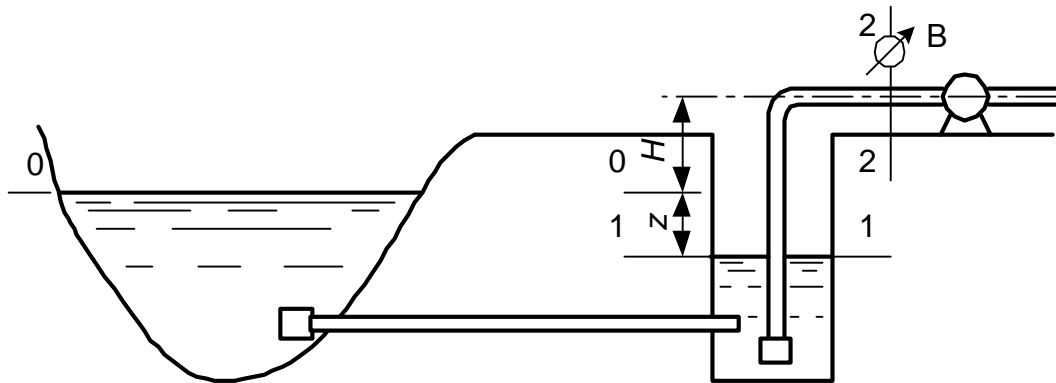


Рис. 9.

Указания к решению задачи 5

Для определения искомой величины вакуума при входе в насос (сечение 2–2) -необходимо знать высоту расположения оси насоса над уровнем воды в водоприемном колодце. Эта высота складывается из суммы высот $H + Z$. Поскольку величина H задана, необходимо определить перепад уровней воды в реке и водоприемном колодце Z .

Величина Z при заданных длине и диаметре самотечной линии зависит от расхода Q и определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений 0–0 и 1–1 (рис. 9):

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_0 \cdot v_0^2}{2 \cdot g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + h_{0-1}. \quad (16)$$

Принимая за горизонтальную плоскость сравнения сечение 1–1 и считая $V_0 = 0$ и $V_1 = 0$, а также учитывая, что давления в сечениях 0–0 и 1–1 равны атмосферному ($p_0 = p_{ам}$ и $p_1 = p_{ам}$), имеем расчетный вид уравнения: $Z = h_{0-1}$, то есть – перепад уровней воды в бассейне и во-

доприемном колодце равен сумме потерь напора при движении воды по самотечной линии. Она состоит из потерь напора по длине и в местных сопротивлениях $h_{0-1} = h_L + h_M$

К местным сопротивлениям относятся вход в трубопровод и выход из него. При определении потерь напора в этих сопротивлениях коэффициент местного сопротивления входа следует принять $\zeta_{вх} = 3$, а выхода $\zeta_{вых} = 1$

Потерю напора по длине следует найти по формуле Дарси, значение коэффициента гидравлического трения определить по формуле А. Д. Альтшуля (см. указания к решению задачи 4), приняв эквивалентную шероховатость стенок труб $k_s = 1$ мм и кинематический коэффициент вязкости $\nu = 0,01 \times 10^{-4}$ м²/с.

Искомая величина вакуума при входе в насос определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений 1–1 и 2–2, при этом за горизонтальную плоскость сравнения следует взять сечение 1–1.

При определении потерь напора во всасывающей линии насоса коэффициент местного сопротивления приемного клапана с сеткой взять по прил. 3, а колена принять $\zeta_{кол} = 0,2$; коэффициент гидравлического трения λ , вычислить по формуле А. Д. Альтшуля.

При движении воды по двум самотечным трубам одинакового диаметра новое значение вакуума в сечении 2–2 определяется из расчета прохождения по одной трубе расхода $Q_1 = Q / 2$. Исходя из этого расхода, следует найти новое, значение перепада уровней Z , а после этого в том же порядке вычислить соответствующую этому значению Z величину вакуума в сечении 2–2.

ЗАДАЧА 6

Бак разделен на два отсека тонкой перегородкой. Из отсека I вода через отверстие в перегородке диаметром d_1 , расположенном на высоте h_1 от дна, поступает в отсек II, а из отсека II через внешний цилиндрический насадок диаметром d_2 выливается наружу. Высота расположения насадка над дном – h_2 . Уровень воды над центром отверстия в отсеке I равен H_1 (рис.10 а, б). Движение установившееся.

Требуется определить:

1. Расход Q ,
2. Перепад уровней воды в отсеках h .

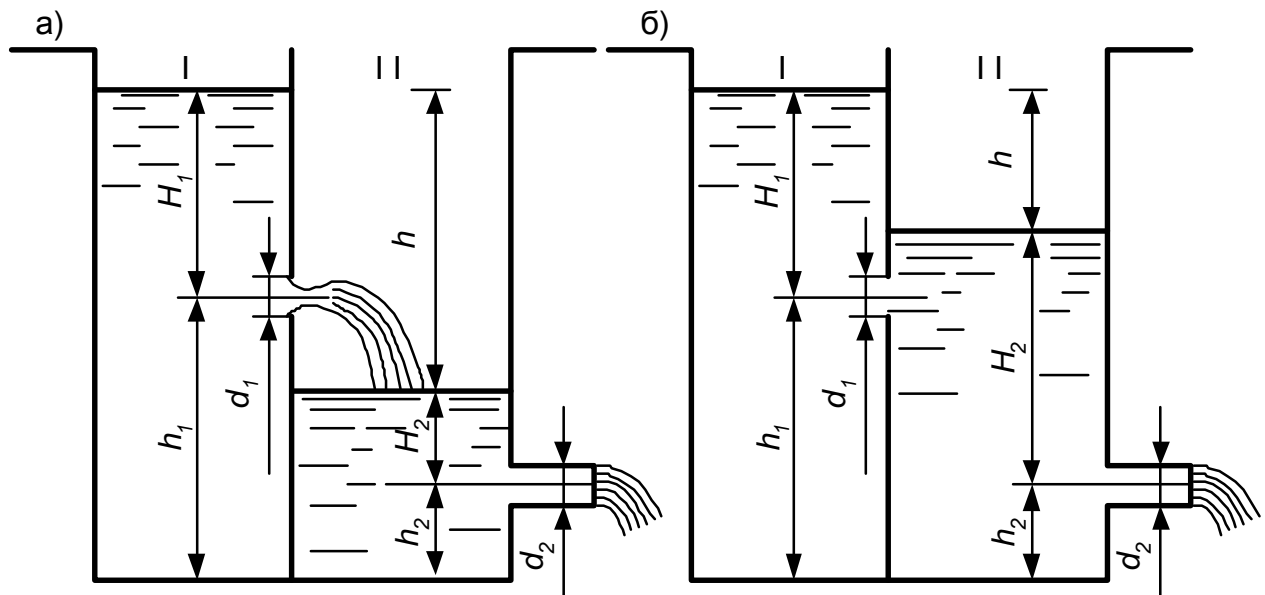


Рис. 10.

Указания к решению задачи 6

Расход жидкости при истечении из **отверстий и насадок** определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (18)$$

где ω - площадь отверстия; H - действующий напор над центром отверстия; μ - коэффициент расхода (при истечении из отверстия можно принять $\mu_0 = 0,62$, из насадки – $\mu_n = 0,82$).

В данной задаче возможны два условия протекания воды из отсека I в отсек II (рис.10а, б): при свободном истечении, когда $(h_2 + H_2) \leq h_1$ и при истечении под уровень (затопленное отверстие), когда $(h_2 + H_2) \geq h_1$. При свободном истечении действующий напор над центром отверстия равен H_1 . При затопленном отверстии истечение будет происходить под действием напора $h = (h_1 + H_1) - (h_2 + H_2)$. Величину коэффициента расхода следует брать той же, что и при свободном истечении.

Решение задачи начинаем с предположения о незатопленности отверстия.

Находим

$$Q = \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1}. \quad (19)$$

Учитывая равенство расходов из отверстия и насадки, определяем

$$H_2 = \frac{Q^2}{\mu_H^2 \cdot \omega_H^2 \cdot 2 \cdot g} \quad (20)$$

Если $(h_2 + H_2) \leq h_1$, то расход определен правильно, в противном случае выполняем перерасчет, считая истечение из отверстия затопленным. В этом случае:

$$\begin{aligned} Q &= \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \\ &= \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 + H_1 - h_2 - H_2)} = \\ &= \mu_H \cdot \omega_H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2}. \end{aligned} \quad (21)$$

Из этого равенства находим H_2 .

Проверяем условие затопляемости $(h_2 + H_2) > h_1$ и определяем искомый расход

$$Q = \mu_H \cdot \omega_H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2}. \quad (22)$$

Проверяем условие затопляемости и определяем искомый расход, после чего находим искомое значение $h = (h_1 + H_1) - (h_2 + H_2)$ и выполняем проверку $Q = \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$.

ЗАДАЧА 7

Назначить диаметр трубопровода d и определить необходимую высоту водонапорной башни H_6 в точке А (рис. 11) для обеспечения расчетной подачи воды с расходом Q потребителю в точке В по трубопроводу длиной L , при разности, отметок земли в точках А и В, равной Z и минимальном свободном напоре в точке В – H_{CB} . Определить свободный напор в точке В – H_{CB} при расходе воды Q_1 , составляющем половину расчетного ($Q_1 = 0,5 Q$).

Примечание. Трубы чугунные, потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10% от потерь напора по длине.

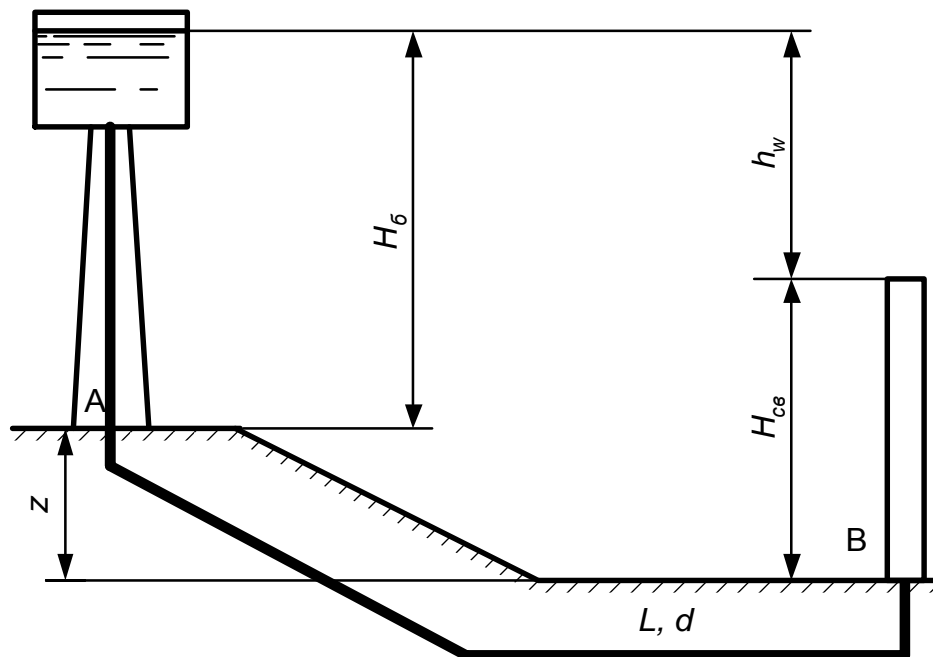


Рис. 11.

Указания к решению задачи 7

Диаметр трубопровода назначается по предельным расходам, представленным в прил. 4.

Необходимая высота водонапорной башни определяется из уравнения

$$H_б + z - H_{св} = h_w, \quad (23)$$

откуда

$$H_б = h_w + H_{св} - z, \quad (24)$$

где h_w – потеря напора на участке трубопровода от точки А до точки В, которая складывается из потери напора по длине и потери напора в местных сопротивлениях:

$$h_w = 1,1 \cdot S_0 \cdot Q^2 \cdot L = 1,1 \cdot \frac{Q^2}{K^2} \cdot L, \quad (25)$$

где S_0 – удельное сопротивление трубы; K – расходная характеристика (модуль расхода) трубы.

$$S_0 = S_0^{КВ} \cdot k_1, \quad (26)$$

$$K = \frac{K^{КВ}}{\sqrt{k_1}}, \quad (27)$$

где $S_0^{кв}$ и $K^{кв}$ – соответственно удельное сопротивление и расходная характеристика трубы, работающей в квадратичной области сопротивления (при скорости $V \geq 1,2$ м/с), значения этих величин приведены в прил. 5; k_1 – поправочный коэффициент, учитывающий неквадратичность зависимости потерь напора от средней скорости движения воды (переходная область сопротивления при скоростях движения воды в трубе $V < 1,2$ м/с), определяется интерполяцией по прил. 6.

Полученное значение $H_б$ округляется до целого числа метров.

Величина свободного напора в конечной точке сети при расходе, равном половине расчетного, определяется по формуле:

$$H'_{св} = H_б + z - h'_w, \quad (28)$$

где h'_w - потеря напора в сети при расходе Q_1 , определяемая по одному из указанных способов.

ЗАДАЧА 8

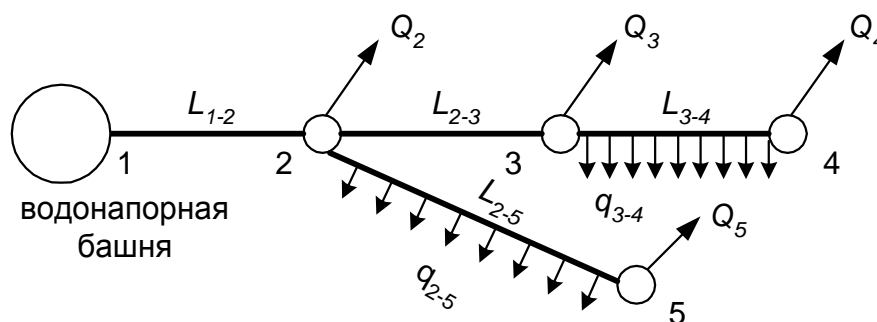


Рис. 12.

На рис. 12 показана схема разветвленной водопроводной сети из чугунных водопроводных труб. Свободный напор $H_{св}$ конечных точек сети должен быть не менее 15 м. Значения длин участков L , узловых расходов Q , и удельных путевых расходов q , приведены в исходных данных. Местность горизонтальная.

Требуется:

1. Определить расчетные расходы воды на каждом участке.
2. Установить диаметры труб на магистральном направлении по предельным расходам.
3. Определить необходимую высоту водонапорной башни.
4. Определить диаметр ответвления от магистрали.
5. Вычислить фактические значения свободных напоров в точках водоотбора.

Указания к решению задачи 8

Решение задачи рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Определить путевые расходы $Q_{n\ 3-4}$, $Q_{n\ 2-5}$ по формуле

$$Q_n = q \cdot L, \quad (29)$$

где q – заданный удельный путевой расход на участке; L – длина участка.

2. Установить расчетные расходы воды для каждого участка сети, руководствуясь тем, что расчетный расход на участке равен сумме узловых расходов, расположенных за данным участком (по направлению движения воды). При этом равномерно распределенные путевые расходы заменяются сосредоточенными поровну в прилегающих узлах. Так, например: $Q_{2-3} = Q_3 + Q_4 + Q_{п3-4}$, $Q_{3-4} = Q_4 + 0,5 \cdot Q_{п3-4}$ и так далее.

3. Наметьте основную магистраль трубопровода. За основную магистраль следует, как правило, принимать линию, соединяющую башню с самой удаленной точкой водопотребления.

4. Наметьте диаметры труб основной магистрали по величинам предельных расходов, пользуясь прил. 4.

5. Определить потери напора на участках магистрали по формуле

$$h = i \cdot L, \quad (30)$$

где i – гидравлический уклон (потеря напора на единицу длины), зависящий от расхода и диаметра трубопровода; L – длина участка трубопровода.

Величины h можно также определять по формуле

$$h = S_0 \cdot Q^2 \cdot L = \frac{Q^2}{K^2} \cdot L. \quad (31)$$

Величины S_0 и K для каждого участка можно определить с помощью прил. 5 и 6 (см. указания к задаче 7).

6. Вычислить высоту водонапорной башни по формуле

$$H_б = H_{св} + \sum h, \quad (32)$$

где $H_{св}$ – свободный напор в конечной точке магистрали; $\sum h$ сумма потерь напора на участках магистрали от башни до конечной точки.

Если, например, за магистральную принята линия 1–2–3–4, то нужно определить сумму потерь напора на участках 1–2, 2–3, 3–4. Полученное значение $H_б$ следует округлить до целого числа, метров.

7. Определить напор воды в начале ответвления от магистрали (в точке 2) по формуле

$$H_2 = H_6 - h_{1-2}, \quad (33)$$

где h_{1-2} – потеря напора на участке магистрали от башни до ответвления.

8. Определить средний гидравлический уклон для ответвления по формуле

$$i_{cp} = \frac{H_2 - H_{св}}{L_{отв}}, \quad (34)$$

где $H_{св}$ – требуемый свободный напор в конечной точке ответвления; $L_{отв}$ – длина ответвления (например, длина участка 2–5).

9. Диаметр трубы выбирается по расходной характеристике

$$K = \frac{Q}{\sqrt{i_{cp}}}, \quad (35)$$

соответствующей среднему гидравлическому уклону ответвления. Пользуясь прил. 5 и полученной величиной K по большему ближайшему табличному значению K выбираем диаметр ответвления.

10. Вычислить фактические значения свободных напоров в точках водоотбора по формуле

$$H_i = H_{i-1} - i \cdot L = H_{i-1} - S_0 \cdot Q^2 \cdot L, \quad (36)$$

где H_i – напор в конечной точке i -го участка; H_{i-1} – напор в начальной точке $i-1$ -го участка; i – фактический гидравлический уклон для рассматриваемого участка; S_0 – удельное сопротивление рассматриваемого участка, определяемое с помощью прил. 5 и 6.

ЗАДАЧА 9

Дорожная насыпь, имеющая высоту $H_{нас}$, ширину земляного полотна $B = 12$ м и крутизну заложения откосов $m = 1,5$, пересекает водоток с переменным расходом, для пропуска которого в теле насыпи укладывается с уклоном i_m , круглая железобетонная труба, имеющая обтекаемый оголовок.

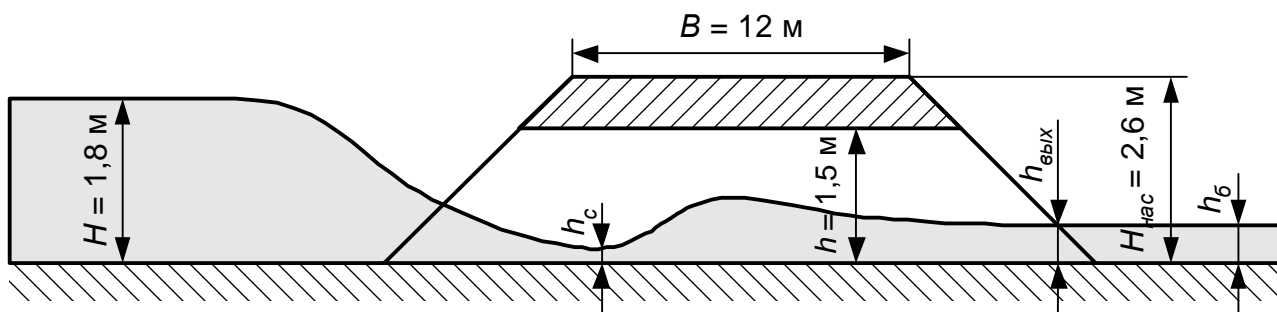
Требуется:

1. Подобрать диаметр трубы для пропуска расхода Q_{max} в напорном режиме при допустимой скорости движения воды в трубе $V_{доп} = 4$ м/с и минимально допустимом расстоянии от бровки насыпи до подпорного уровня $a_{min} = 0,5$ м.

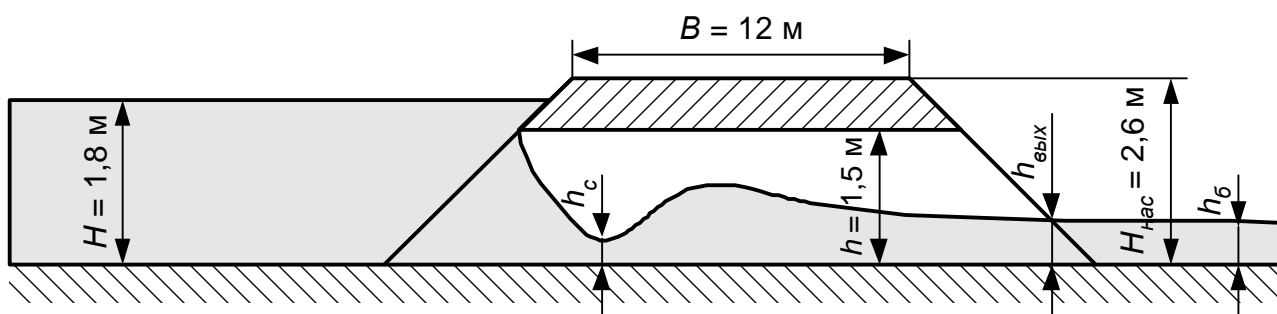
2. Определить фактическую скорость движения воды в трубе V_{ϕ} при пропуске максимального расхода и глубину H воды перед трубой, соответствующую этому расходу.

3. Рассчитать предельные расходы и соответствующие им глубины перед трубой, при которых труба будет работать в безнапорном и полунпорных режимах.

а) безнапорный режим



б) полунпорный режим



в) напорный режим

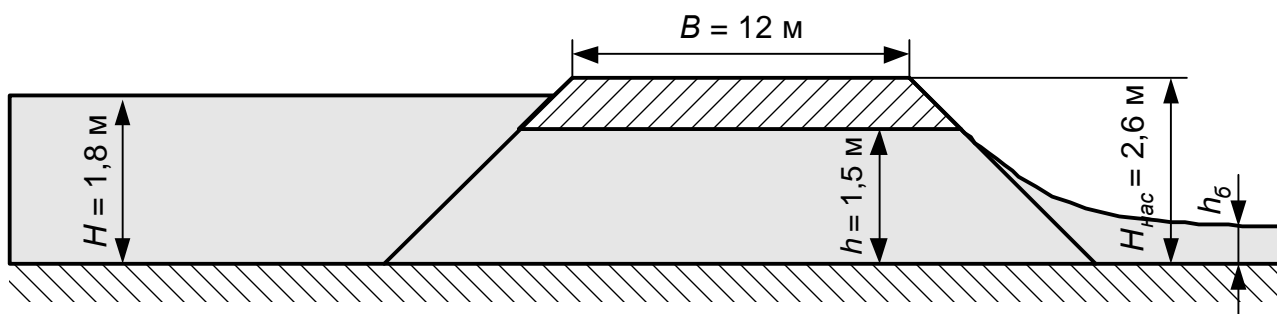


Рис. 13.

Указания к решению задачи 9

Водопрпускные трубы под насыпями дорог (железных и автомобильных) служат для пропуска расходов воды периодически действующих водотоков во время ливневых или весенних паводков.

В настоящее время чаще всего применяются водопрпускные трубы круглого сечения.

По числу отверстий трубы бывают одноочковые, двухочковые, трехочковые и многоочковые.

Согласно действующим типовым проектам круглые дорожные водопропускные трубы имеют следующие стандартные отверстия: 0,75; 1,0; 1,25; 1,5 и 2 м.

Одной из задач гидравлического расчета труб является определение необходимого диаметра труб. При этом считается, что пропускная способность многоочковых (двухочковых, трехочковых и так далее) труб равна суммарной пропускной способности соответствующего количества одноочковых труб.

Гидравлические расчеты водопропускных труб выполняют в зависимости от условий их работы.

Различают следующие режимы работы труб:

1) безнапорный, когда входное сечение не затоплено и на всем протяжении трубы поток имеет свободную поверхность (рис. 13 а);

2) полунапорный, когда входное сечение трубы затоплено, то есть на входе труба работает полным сечением, а на остальном протяжении поток имеет свободную поверхность (рис. 13 б);

3) напорный, когда труба работает полным сечением, то есть все поперечное сечение трубы по всей длине полностью заполнено водой (рис. 13 в).

Напорный режим имеет место при одновременном выполнении трех условий:

1) входной оголовок должен быть обтекаемым;

2) $H > 1,4 d$;

3) $i_m < i$, где i – гидравлический уклон.

Пропускная способность напорных труб вычисляется по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H + i_m \cdot L - 0,85 \cdot d)}. \quad (37)$$

Коэффициент расхода μ определяется зависимостью

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{ex} + \lambda \cdot \frac{L}{d}}}, \quad (38)$$

где ζ_{ex} – коэффициент сопротивления на входе, для обтекаемых оголовков $\zeta_{ex} = 0,2$; λ – гидравлический коэффициент трения (принять $\lambda = 0,025$); L – длина трубы.

При напорном режиме трубы обладают наибольшей пропускной способностью.

В соответствии с вышеизложенным, задача решается в следующем порядке.

Исходя из заданной допустимой скорости движения воды в трубе $V_{доп}$, определяются площадь живого сечения потока и диаметр напорной трубы

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \omega}{\pi}}. \quad (39)$$

Найденный диаметр округляется до ближайшего большего стандартного значения $d_{см}$ (0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0 м), и вычисляется фактическая скорость движения воды

$$V_{ф} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{см}^2}. \quad (40)$$

Далее определяется длина трубы L . При ширине земляного полотна B , высоте насыпи $H_{нас}$ и крутизне заложения ее откосов m длина трубы

$$L = 2 \cdot H_{нас} \cdot m + B. \quad (41)$$

После этого вычисляется значение коэффициента расхода по формуле (38).

Затем из формулы (37) определяется напор воды перед трубой:

$$H = \frac{Q^2}{\mu^2 \cdot \omega^2 \cdot 2 \cdot g} + 0,85 \cdot d - i_m \cdot L. \quad (42)$$

При этом должны быть выдержаны условия: $H > 1,4 d$;

$H \leq (H_{нас} - 0,5)$ и $i_m < i$. Проверка последнего условия проводится на основании формулы Шези:

$$Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i} = K \cdot \sqrt{i}, \quad (43)$$

откуда гидравлический уклон:

$$i = \frac{Q^2}{K^2}, \quad (44)$$

где K – расходная характеристика, $K = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R}$, м³/с; C – коэффициент Шези, $C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$, м^{0,5}/с; n – коэффициент шероховатости, $n = 0,014$.

Если условия для напорного режима не соблюдаются, то принимается двухочковая труба. Считается, что расход по каждой трубе одинаков и равен $Q / 2$. По формуле (39) определяется диаметр трубы. Если двухочковая труба не обеспечивает напорный режим, то принимается трехочковая и так далее.

Полунапорный режим бывает при условии $H > 1,2 d$.

Пропускная способность полунапорных труб с учетом уклона дна определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot [H - (0,708 - 2 \cdot i_m) \cdot d]}, \quad (45)$$

где μ – коэффициент расхода, зависящий от типа оголовка (для условий данной задачи принять $\mu = 0,7$); ω – площадь сечения трубы; d – диаметр отверстия трубы; i_m – уклон дна трубы.

Пропускная способность полунапорных труб больше, чем безнапорных.

Верхний предел существования полунапорного режима определяется условием $H = 1,4 d$. Соответствующий ему предельный расход, вычисляемый по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot [1,4 \cdot d - (0,708 - 2 \cdot i_m) \cdot d]}. \quad (46)$$

Условием существования безнапорного режима является

$$H \leq 1,2 d,$$

где H – напор (глубина) воды перед трубой; d – диаметр трубы.

Пропускная способность безнапорных труб может быть определена по формуле А. А. Угинчуса:

$$Q = \mu \cdot b_k \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{3/2}, \quad (47)$$

где μ – коэффициент расхода (принять $\mu = 0,335$); b_k – средняя ширина потока в сечении с критической глубиной (определяется по графику, представленному на рис. 14).

Верхний предел существования безнапорного режима определяется условием $H = 1,2 d$, а соответствующий ему предельный расход определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot b_k \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (1,2 \cdot d)^{3/2}. \quad (48)$$

Для определения b_k вычисляется отношение

$$\frac{Q}{b_k} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (1,2 \cdot d)^{3/2}, \quad (49)$$

затем находится значение безразмерного параметра

$$\frac{Q}{b_k \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d}}, \quad (50)$$

после чего по графику $\frac{b_K}{d} = f\left(\frac{Q}{b_K \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d}}\right)$ (рис. 14) определяется соответствующая этому параметру величина b_K / d , по которой определяется значение b_K

$$b_K = \left(\frac{b_K}{d}\right) \cdot d. \quad (51)$$

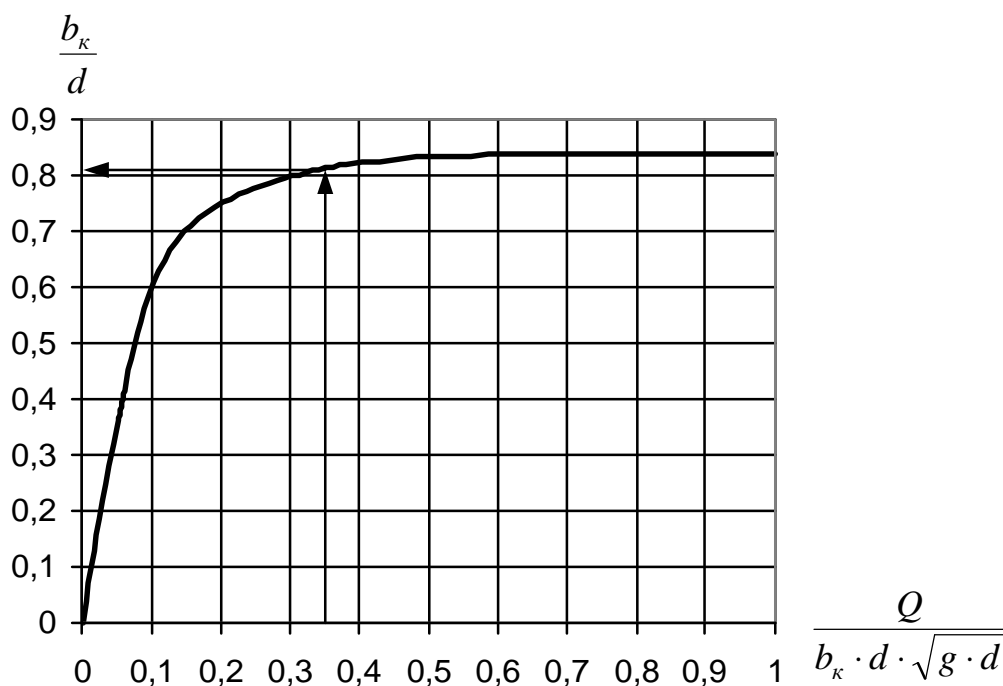


Рис. 14.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения кинематического коэффициента вязкости воды при различной температуре.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40
$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	0,0178	0,0131	0,0101	0,009	0,0066
$t, ^\circ\text{C}$	50	60	70	80	90
$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	0,0058	0,0048	0,004	0,0036	0,003

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значение коэффициента $\zeta_{\text{н.с.}}$ при внезапном сужении трубопровода

$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\zeta_{\text{н.с.}}$	0,41	0,4	0,38	0,36	0,34	0,3	0,27	0,2	0,16	0,1	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Коэффициенты сопротивления всасывающих клапанов с сеткой

$d, \text{мм}$	50	75	100	150	200	250
$\zeta_{\text{сет}}$	10	8,5	7	6	5,2	4,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Предельные расходы Q , л/с и скорости V , м/с в водопроводных трубах.

Диаметр условного прохода	Трубы			
	Стальные		Чугунные	
	Q	V	Q	V
100	11,7	1,15	9,4	1,15
125	16,6	1,19	15,0	1,18
150	21,8	1,12	25,3	1,40
175	29,2	1,30	—	—
200	46,0	1,34	45,8	1,42
250	71,0	1,34	73,5	1,46
300	103	1,35	108	1,48
350	140	1,35	149	1,53
400	184	1,36	197	1,56

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Удельные сопротивления $S_0^{кв}$, $с^2/м^6$ и расходные характеристики $K^{кв}$, $м^3/с$, для бывших в эксплуатации водопроводных труб при скорости $V \geq 1,2$.

Диаметр условного прохода	Трубы			
	Стальные		Чугунные	
	$S_0^{кв}$	$K^{кв}$	$S_0^{кв}$	$K^{кв}$
100	173	0,076	312	0,0565
125	76,4	0,114	96,7	0,102
150	30,65	0,181	37,1	0,164
175	20,8	0,219	—	—
200	6,96	0,379	8,09	0,352
250	2,19	0,675	2,53	0,628
300	0,85	1,085	0,95	1,027
350	0,373	1,637	0,437	1,512
400	0,191	2,288	0,219	2,14

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Значение поправочного коэффициента K_1 в зависимости, от средней скорости движения потока V .

V , м/с	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
k_1	1,41	1,33	1,28	1,24	1,20	1,17 5	1,15	1,13	1,115
V , м/с	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	1,00	1,10	1,20
k_1	1,10	1,085	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,01 5	1,00

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Исходные данные к задачам (2001-2002 г).

№ задачи	Исходные данные	№ варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	$H, \text{ м}$	2,0	2,5	2,6	3,0	3,5	3,7	4,0	4,2	4,5	4,7
	$h, \text{ м}$	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2
	$b, \text{ м}$	0,4	0,8	0,7	1,1	0,9	1,5	1,3	1,8	1,6	2,0
	$\rho_{\text{кл}} 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	1,9 5	2,0 0	2,0 5	2,1 0	2,1 5	2,2 0	2,1 5	2,1 0	2,0 5	2,0 0
3	$D, \text{ м}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,3	1,7	2,2	2,8	3,5
	$H, \text{ м}$	1,5	1,7 5	2,5	3,0	3,5	1,8	2,0	2,6	3,4	4,0
4	№ рис.	3	4	5	6	7	6	5	4	3	7
	$Q, \text{ л/с}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
	$d_1, \text{ мм}$	20	32	50	32	32	50	75	50	75	50
	$d_2, \text{ мм}$	15	50	40	50	50	75	50	75	50	75
	$d_3, \text{ мм}$	20	32	32	40	75	40	40	50	75	100
	$L_1, \text{ м}$	1	5	9	1	1	2	6	2	5	3
	$L_2, \text{ м}$	0,4	8	3	3	3	10	2	6	2	10
	$L_3, \text{ м}$	1,4	3	1	2	9	1	1	2	5	12
	$t, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	40	30	20	10	60
5	$d, \text{ мм}$	50	75	100	150	200	250	200	150	100	75
	$L, \text{ м}$	20	30	50	100	75	150	200	100	75	35
	$L_{\text{вс}}, \text{ м}$	10	15	20	10	25	30	20	15	10	12
	$d_{\text{вс}}, \text{ мм}$	50	75	100	150	200	250	200	150	100	75
	$Q, \text{ л/с}$	3,0	6,7	14, 0	26, 6	62, 8	78, 5	47, 1	35, 4	11, 8	8,0
	$H, \text{ м}$	1,5	2,5	2,0	3,0	2,6	2,4	2,2	1,5	1,8	1,0

№ задачи	Исходные данные	№ варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	d_1 , см	2	3	2,5	3,5	1,5	4	4,5	5	3	2
	d_2 , см	1,5	3	2	4	1,5	5	3,5	4	4,5	2
	H_1 , м	1	3	2,5	4	2	3,5	1,5	3,5	3	2
	h_1 , м	1	2	1,5	3	2,5	3	1	3	2,5	1,5
	h_2 , м	1	1,5	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1
7	Q , л/с	100	75	45	25	150	160	60	35	50	120
	L , км	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	0,3	0,7 5	1,2	0,8	0,6
	Z , м	2	3	5	6	10	4	3	9	5	8
	$H_{св}$, м	12	16	20	28	25	16	12	28	20	24
8	L_{1-2} , м	100	100	400	500	300	200	600	800	700	150
	L_{2-3} , м	400	300	400	500	400	200	100	600	700	250
	L_{3-4} , км	0,1	0,4	0,3	0,3	1,0	0,2	0,5	0,6	0,7	0,8
	L_{2-5} , км	0,2	0,2	1,0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,3	0,9
	Q_2 , л/с	8	8	6	12	10	7	11	9	15	13
	Q_3 , л/с	7	6	4	14	5	8	9	10	15	5
	Q_4 , л/с	4	10	6	5	10	9	7	11	12	8
	Q_5 , л/с	6	6	10	10	15	12	16	15	8	20
	q_{3-4} , л/с м	0,0 6	0,0 2	0,0 4	0,0 6	0,0 3	0,0 5	0,0 1	0,0 5	0,0 2	0,0 4
	q_{2-5} , л/с м	0,0 5	0,0 3	0,0 1	0,0 5	0,0 2	0,0 4	0,0 2	0,0 6	0,0 4	0,0 2
9	Q_{max} , м ³ /с	4,5	6	8	3,9	14, 5	3	12, 8	1,7	10	5
	$H_{нас}$, м	3,0	2,6	3,2	3,6	5,0	2,2	4,1	2,4	5,4	4,0
	$i_m \cdot 10^3$	8	3	20	6	4	10	3	15	12	5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика. – Л.: Энергия, 1982. – 672 с.
2. Угинчус А. А., Чугаева Е. А. Гидравлика – Л.: Стройиздат, 1971. – 350 с.
3. Альтшуль А. Д., Киселев П. Г. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1975 – 323 с.
4. Константинов Н. М., Петров Н. А., Высоцкий Л. И. Гидравлика, гидрология и гидрометрия: В 2-х частях. Ч. 1. Общие законы. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.
5. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 422 с.
6. Юшкин В. В. Гидравлика и гидравлические машины. – Минск: Высшая школа, 1974. – 270 с.
7. Угинчус А. А. Гидравлика гидромашины и гидроприводы. – Л.: ГЭИ, 1970. – 390 с.
8. Примеры гидравлических расчетов / Под ред. Н. М. Константинова. – М.: Транспорт, 1987. – 498 с.
9. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Под общей ред. Б. Б. Некрасова. – Минск: Высшая школа, 1985. – 365 с.