

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Экология и рациональное использование водных  
ресурсов»**

**Р. Н. ВОСТРОВА**

# **ГИДРАВЛИКА, ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОМЕТРИЯ ВОДОТОКОВ**

**Пособие по выполнению контрольной работы № 1 и № 2**

**Гомель 2006**

**Сдана в РИО**

УДК 556. 536 (075.8)  
А162

**Р е ц е н з е н т** – заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация железных дорог» канд. техн. наук., доцент **В.П. Ковтун** (БелГУТ).

### **Р. Н. Вострова**

А162 гидравлика, гидрология и гидрометрия водотоков: Пособие по выполнению контрольной работы . - Гомель: УО «БелГУТ», 2006. – с.

Приведены варианты задач к контрольной работе и методические указания по их решению.

Предназначено для самостоятельной работы студентов ФБО специальности 1-70 03 01 "Автомобильные дороги"; 1-37 02 05 «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство»

УДК 556. 536 (075.8)

© Р. Н. Вострова, 2006.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие требования к выполнению контрольной работы .....	
1 Варианты заданий на контрольную работу №1 с указаниями по решению задач.....	
2 Варианты заданий на контрольную работу №2 с указаниями по решению задач.....	
3 Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины.....	
4 Вопросы для СУРС.....	
Приложение А.....	
Приложение Б.....	
Приложение В.....	
Список литературы.....	

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ №1 и №2**

Контрольная работа выполняется с целью закрепления знаний, полученных при самостоятельном изучении дисциплины «Гидравлика, гидрология и гидрометрия водотоков», и приобретения навыков практического применения этих знаний студентами специальности ФБО.

В контрольной работе №1 предусматривается решение пяти задач по следующим темам:

- сила давления жидкости на плоские стенки;
- сила давления жидкости на криволинейные поверхности;
- истечение жидкости через отверстия и насадки;
- расчет коротких трубопроводов;
- расчет длинных трубопроводов с применением уравнения Бернулли.

Контрольная работа № 2 предусматривает решение двух задач, которые включают в себя:

- гидравлический расчет тупикового трубопровода;
- определение диаметра водопропускной трубы под насыпью дорожного полотна;

Приступая к выполнению контрольной работы, указанные выше темы должны быть изучены по рекомендуемой литературе [1,2,8] или, что еще лучше, законспектированы. Конспект весьма может пригодиться при подготовке к экзамену. Важно также, чтобы студент посетил все лекционные занятия, которые проводятся, как правило, одновременно с выдачей задания на контрольную работу.

Студент может воспользоваться литературой, где приведены примеры решения задач на указанные темы [6,7].

Решение задачи рекомендуется приводить с пояснительным рисунком, где указываются размеры, приложенные силы и другие вычисляемые параметры. Эпюры сил и давлений необходимо строить с учетом

масштабов, для простоты выполнения возможно использование миллиметровой бумаги.

Оформляются задачи на листах писчей бумаги форматом А4 (210x297). Первый лист — титульный. Все последующие листы оформляются рамкой. Образец оформления титульного листа приведен в *ПРИЛОЖЕНИИ Б*.

На последнем листе приводится список литературы, ссылки на которую указываются в тексте при решении задачи в квадратных скобках.

Текст желательно располагать на одной стороне листа. Вторая, свободная сторона, может пригодиться для замечаний рецензента или же внесения исправлений, если в процессе рецензирования будут обнаружены ошибки. Если некоторый коэффициент или параметр взят из справочной литературы, то необходимо указать ссылку на литературу. Все математические действия, применяемые при решении задач, должны быть пояснены. Следует соблюдать также и определенный порядок выполнения математических действий. Сначала записывается расчетная формула, затем проставляются значения всех величин, входящих в формулу, и затем записывается ответ. Результаты промежуточных вычислений приводить не нужно.

Полученный ответ обязательно снабжается размерностью. Отсутствие размерности или же неправильное ее проставление считается за ошибку и учитывается при общей оценке работы.

Прорецензированная работа сопровождается заключением рецензента: «К защите» или «К защите не допускается». Допущенная к защите работа может содержать и замечания рецензента. Все они в подготовленной к защите работе должны быть учтены и студент в процессе защиты должен доказать правильность выполненного им решения.

Рецензирование контрольных работ проводится перед сессией. Поэтому они должны быть сданы на кафедру для проверки заблаговременно. Следует не забывать, что срок рецензирования 5 дней. Поэтому работы, сданные уже после прибытия на сессию, могут ко дню экзамена оказаться не только не защищенными, но и не прорецензированными. А это влечет за собой не допуск к экзамену.

Студент допускается до экзамена, если он не имеет задолженности по контрольным и лабораторным работам.

Выбор варианта на контрольную работу №1 и №2 осуществляется по последней цифре учебного шифра.

## 1 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ №1, С УКАЗАНИЯМИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Определить силу избыточного гидростатического давления на 1 погонный метр длины стенки, предварительно построив эпюру гидростатического давления (рисунок 1). Плотность кладки  $\rho_{\text{кл}}$ . Глубина воды перед стенкой  $h$ , плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

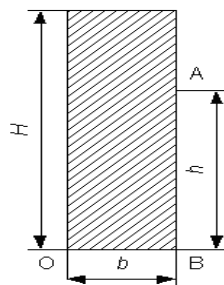


Рисунок 1

Исходные данные принять по таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные	Номер вариантов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Высота $h$ , м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина $b$ , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	1	1,1	1,2	1,3
Плотность $\rho_{\text{кл}}$ , $\text{кг/м}^3$	750	780	790	800	810	820	830	840	850	860

**Указания к решению задачи 2.** Для построения эпюры гидростатического давления на стенку следует в точках А и В определить избыточное давление по формуле:

$$p_{изб} = \rho_e \cdot g \cdot h, \quad (1)$$

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

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

Сила избыточного гидростатического давления на плоскую стенку вычисляется по формуле:

$$P_{изб} = p_{ц.т.} \cdot \omega, \quad (2)$$

где  $p_{ц.т.}$  – давление в центре тяжести смоченной поверхности, Па ;

$\omega$  – площадь смоченной поверхности, м<sup>2</sup>.

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

$$L_{ц.д.} = L_{ц.т.} + \frac{J}{L_{ц.т.} \cdot \omega}, \quad (3)$$

где  $L_{ц.д.}$  – расстояние в плоской стенке от центра давления до свободного уровня жидкости, м;

$L_{ц.т.}$  – расстояние в плоской стенке от центра тяжести стенки до свободного уровня жидкости, м;

$\omega$  – площадь смоченной поверхности, м;

$J$  – момент инерции смоченной плоской площадки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести. Для плоской прямоугольной фигуры:

$$J = L \cdot h^3 / 12, \quad L = 1, \text{ пог. м} \quad (4)$$

Определив силу избыточного гидростатического давления  $P_{изб}$  и точку ее приложения  $L_{ц.д.}$ , можно найти опрокидывающий момент

$$M_{опр} = P_{изб} \cdot (h - L_{ц.д.}). \quad (5)$$

Удерживающий момент относительно точки О равен:

$$M_{уд} = G \cdot \frac{b}{2}, \quad (6)$$

где  $G$  – вес подпорной стенки, кН.

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

$$K = \frac{M_{уд}}{M_{опр}} \quad (7)$$

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

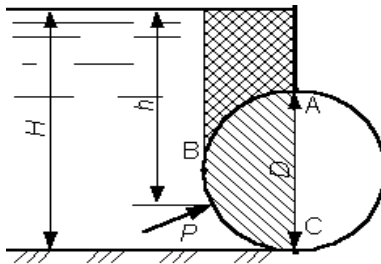


Рисунок 2

Исходные данные принять по таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные	Номер вариантов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Высота $h$ , м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина $b$ , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	1	1,1	1,2	1,3
Плотность $\rho_{\text{кл.}}$ , $\text{кг/м}^3$	750	780	790	800	810	820	830	840	850	860

**Указания к решению задачи 2.** Суммарная сила избыточного давления воды на цилиндрическую поверхность определяется по формуле:



$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \quad (8)$$

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:

$$P_x = \rho_e \cdot g \cdot h_{ц.т.} \cdot \omega_y, \quad (9)$$

где  $h_{ц.т.}$  – расстояние по вертикали от центра тяжести вертикальной проекции цилиндрической поверхности до уровня воды, м;  $\omega_y$  – площадь вертикальной проекции цилиндрической поверхности, м<sup>2</sup>.

Вертикальная составляющая силы избыточного гидростатического давления определяется по формуле:

$$P_y = \rho_e \cdot g \cdot W, \quad (10)$$

где  $W$  – объем тела давления, м<sup>3</sup>.

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  $\varphi$  к вертикали.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_x}{P_y} \quad (11)$$

**Задача 3.** Из открытого резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному трубопроводу (эквивалентная шероховатость  $\Delta_s = 0,1$  мм), состоящему из труб различного диаметра  $d$  и различной длины  $L$ , вытекает в атмосферу вода, расход которой  $Q$  и температура  $t$  °С (рисунок 4).

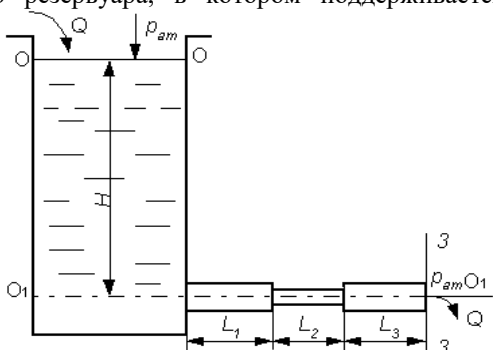


Рисунок 4

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.

Исходные данные принять по таблице 3.

Таблица 3

Исходные данные	Номер вариантов										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Длина $l_1$ , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	1	1,1	1,2	1,3	
Длина $l_2$ , м	1	1,1	2	2,2	3	3,5	4	4,5	5	1,5	
Длина $l_3$ , м	3	5	7	8	4	3	2	8	3,5	6	
Диаметр $d_1$ , мм	50	100	150	200	120	130	140	210	220	230	
Диаметр $d_2$ , мм	25	55	75	100	90	100	120	130	140	150	
Диаметр $d_3$ , мм	70	110	160	210	125	135	145	135	225	235	
$Q$ , л/с	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	

**Указания к решению задачи 3.** Эта задача решается на основе применения уравнения Д. Бернулли. Для плавно изменяющегося потока вязкой жидкости, движущейся от сечения 1 к сечению 2 (рисунок 5), уравнение Д. Бернулли имеет вид:

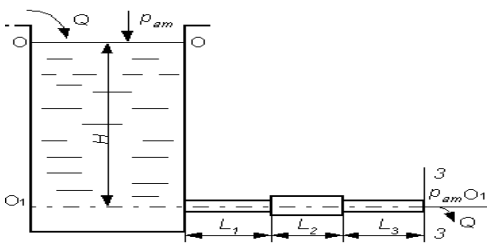


Рисунок 5

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_{1-2}, \quad (11)$$

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;

$\alpha_1, \alpha_2$  – 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  $\alpha$  можно принять равным 1, а для турбулентного  $\alpha = 2$ .

$h_{1-2}$  – потери напора на преодоление сил сопротивления при движении потока от сечения 1 до сечения 2.

*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  $z_0, p_0, v_0$ , а к сечению 3-3 –  $z_3, p_3, v_3$ .

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 напора в резервуаре);  $p_0 = p_{ат}$  (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.

$$v_{\phi} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{cm}^2}, \quad (12)$$

5. По скоростям движения воды вычисляются числа Рейнольдса, и устанавливается режим движения на каждом участке.

$$Re = v d / \nu. \quad (13)$$

Значение кинематического коэффициента вязкости  $\nu$  определим в зависимости от температуры (*ПРИЛОЖЕНИЕ А*)

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  $h_{вр}$  и внезапное сужение  $h_{вс}$ ).

Потери по длине следует определять по формуле Дарси:

$$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (14)$$

где  $L, d$  – соответственно длина и диаметр расчетного участка трубопровода;

$v$  – средняя скорость движения воды на рассматриваемом участке.

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси) может быть определен по формуле Дарси в случае ламинарного режима движения

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (15)$$

или по формуле Альтшуля в случае турбулентного движения:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{k_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (16)$$

где  $k_s = \Delta_s$  – эквивалентная шероховатость стенки трубы, мм;

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

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (17)$$

где  $v$  – средняя скорость за данным местным сопротивлением;  $\zeta$  безразмерный коэффициент местного сопротивления определяется по справочнику.

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

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

$$H = \frac{\alpha_3 \cdot v_3^2}{2 \cdot g} + \sum h_L + \sum h_M \quad (18)$$

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  $h_{вх}$ ).

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  $h_{вр}$ ), 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  $v^2 / (2 \cdot g)$ . Поэтому, чтобы построить пьезометрическую линию, нужно вычислить на каждом участке величину  $v^2 / (2 \cdot g)$  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  $v^2 / (2 \cdot g)$ .

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

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

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.

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

В пределах каждого участка пьезометрическая линия должна быть параллельна напорной, поскольку в пределах каждого участка постоянна величина  $v^2/(2g)$ . На тех участках, где скорость больше, расстояние между напорной и пьезометрической линиями

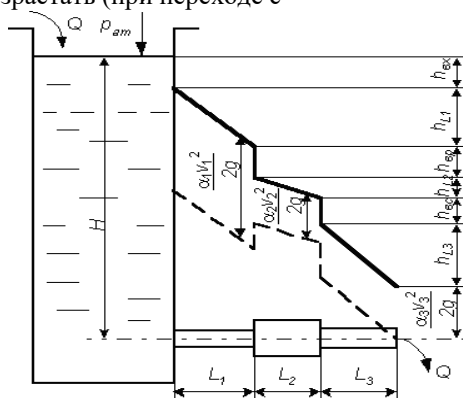


Рисунок 6

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. 6.

**Задача 4.** Бак разделен на два отсека тонкой перегородкой. Из отсека I вода через отверстие в перегородке диаметром  $d_1$ , расположенное 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  $H_1$  (рисунок 7). Движение установившееся.

Требуется определить:

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

$h$ .

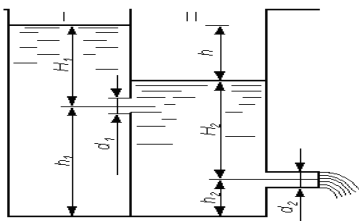


Рисунок 7

Исходные данные принять по таблице 4.

Таблица 4

Исходные данные	Номер вариантов										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Высота $h_1$ , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	1	1,1	1,2	1,3	
Высота $H_1$ , м	1	1,1	2	2,2	3	3,5	4	4,5	5	1,5	
Высота $h_2$ , м	3	5	7	8	4	3	2	8	3,5	6	
Диаметр $d_1$ , мм	50	100	150	200	120	130	140	210	220	230	
Диаметр $d_2$ , мм	25	55	75	100	90	100	120	130	140	150	
Диаметр $d_3$ , мм	70	110	160	210	125	135	145	135	225	235	

**Указания к решению задачи 4.** Расход жидкости при истечении из отверстий и насадок определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (19)$$

где  $\omega$  - площадь отверстия;

$H$  - действующий напор над центром отверстия;

$\mu$  - коэффициент расхода (при истечении из отверстия можно принять  $\mu_o = 0,62$ , из насадка  $\mu_n = 0,82$ ).

В данной задаче возможны два условия протекания воды из отсека I в отсек II ( 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

$$Q = \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1} \quad (20)$$

Учитывая равенство расходов из отверстия и насадки, определяем

$$H_2 = \frac{Q^2}{\mu_H^2 \cdot \omega_H^2 \cdot 2 \cdot g} \quad (21)$$

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:

$$\begin{aligned} Q &= \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \\ &= \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 + H_1 - h_2 - H_2)} = \\ &= \mu_H \cdot \omega_H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Из этого равенства находим  $H_2$ . Проверяем условие затопляемости  $(h_2 + H_2) > h_1$  и определяем искомый расход

$$Q = \mu_H \cdot \omega_H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2} \quad (23)$$

Проверяем условие затопляемости и определяем искомый расход, после чего находим искомое значение  $h = (h_1 + H_1) - (h_2 + H_2)$  и выполняем проверку.

$$Q = \mu_0 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (24)$$

**Задача 5.** Вода из реки ( $t = 12^\circ \text{C}$ ) 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 –  $d_{\text{вс}}$ , длина –  $L_{\text{вс}}$ . Ось насоса расположена выше уровня воды в реке на величину  $H$  (рисунок 8).

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  $d$ ?

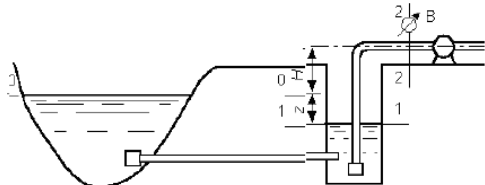


Рисунок 8



Исходные данные принять по таблице 5.

Таблица 5

Исходные данные	Номер вариантов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q, л/с	20	40	60	80	100	80	60	40	20	50
Длина L <sub>вс.</sub> , м	5	6	7	6,5	6,8	6,9	5,5	5,6	5,7	5,8
Диаметр d <sub>вс.</sub> , мм	200	100	120	150	100	120	125	135	140	150
Высота H, м	1	1,1	2	2,2	3	3,5	4	4,5	5	1,5
Диаметр d, мм	250	100	150	200	120	130	140	210	220	230

**Указания к решению задачи 5.** Для определения искомой величины вакуума при входе в насос (сечение 2–2)  $p_{\text{вак}}$  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 самоточной линии зависит от расхода  $Q$  и определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений О–О и 1–1 (рисунок 8):

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_0 \cdot v_0^2}{2 \cdot g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + h_{0-1} \quad (25)$$

Принимая за горизонтальную плоскость сравнения сечение 1–1 и считая  $v_0 = 0$  и  $v_1 = 0$ , а также учитывая, что давления в сечениях О–О и 1–1 равны атмосферному ( $p_0 = p_{\text{ат}}$  и  $p_1 = p_{\text{ат}}$ ), имеем расчетный вид уравнения:

$$z = h_{0-1}, \quad (26)$$

то есть – перепад уровней воды в бассейне и водоприемном колодце равен сумме потерь напора при движении воды по самоточной линии. Она состоит из потерь напора по длине и в местных сопротивлениях

$$h_{0-1} = h_L + h_M \quad (27)$$

К местным сопротивлениям относятся вход в трубопровод и выход из него. При определении потерь напора в этих сопротивлениях коэффициент  $\zeta$  местного сопротивления входа следует принять  $\zeta_{\text{вх}} = 3$ , а выхода  $\zeta_{\text{вых}} = 1$  [4,5]. 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), принимаем эквивалентную шероховатость стенок труб  $\Delta_{\text{э}} = 1$  мм и кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

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  $\zeta = 5$ , а колена принять  $\zeta_{\text{кол}} = 0,2$ ; коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  вычислить в соответствие с определенным по числу Рейнольдса режимом движения [4,5].

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.

## 2 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 2, С УКАЗАНИЯМИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

**Задача 6.** На рис. 12 показана схема разветвленной водопроводной сети из чугунных водопроводных труб. Свободный напор  $H_{\text{св}}$  конечных точках 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 отвления от магистрали.
5. Вычислить фактические значения свободных напоров в точках водоотбора.

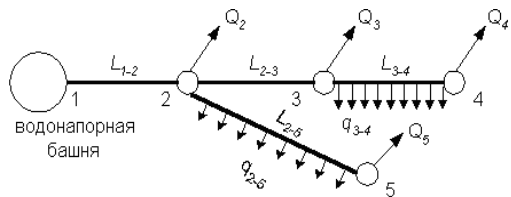


Рисунок 9

Исходные данные принять по таблице 6.

Таблица 6

Исходные данные	Номер вариантов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Длина $L_{1-2}$ , м	200	100	120	150	100	120	125	135	140	150
Длина $L_{2-3}$ , м	300	200	220	300	400	320	225	335	240	100
Длина $L_{1-2}$ , м	100	300	125	155	150	122	135	145	150	180
Длина $L_{2-3}$ , м	210	150	130	140	120	125	130	155	145	155
$q_{3-4}$ , л/с	10	7	10	5	15	6	7	3	2	1
$q_{2-5}$ , л/с	7	3	5	4	6	2	1	10	5	4

### Указания к решению задачи 6

Решение задачи рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

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

$$Q_n = q \cdot L, \quad (28)$$

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:

$$Q_{2-3} = Q_3 + Q_4 + Q_{n\ 3-4}, \quad Q_{3-4} = Q_4 + 0,5 \cdot Q_{n\ 3-4} \quad (29)$$

и так далее.

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

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

5. Определить потери напора на участках магистрали по формуле

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

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 справочной литературы [4,5].

6. Вычислить высоту водонапорной башни по формуле

$$H_{\bar{b}} = H_{св} + \sum h, \quad (32)$$

где  $H_{св}$  – свободный напор в конечной точке магистрали;

$h$  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  $H_{\bar{b}}$  следует округлить до целого числа, метров.

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

$$H_2 = H_{\bar{b}} - h_{1-2}, \quad (33)$$

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

7. Определить средний гидравлический уклон для ответвления по формуле

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

где  $H_{св}$  – требуемый свободный напор в конечной точке ответвления;

$L_{отв}$  – длина ответвления (например, длина участка 2–5).

8. Диаметр трубы выбирается по расходной характеристике

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

соответствующей среднему гидравлическому уклону ответвления. Пользуясь *ПРИЛОЖЕНИЕМ А* и полученной величиной  $K$  по большему ближайшему табличному значению  $K$  выбираем диаметр ответвления.

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

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

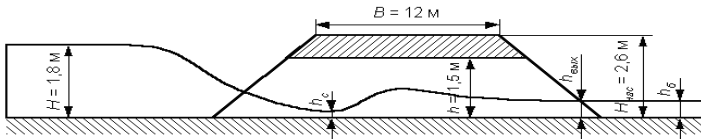
где  $H_i$  – напор в конечной точке  $i$ -го участка;  
 $H_{i-1}$  – напор в начальной точке  $i-1$ -го участка;  
 $i$  – фактический гидравлический уклон для рассматриваемого участка;  
 $S_0$  – удельное сопротивление рассматриваемого участка [4,5]

**Задача 7.** Дорожная насыпь (рисунок 10), имеющая высоту  $H_{\text{нас}}$ , 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  $i_r$ , круглая железобетонная труба, имеющая обтекаемый оголовок.

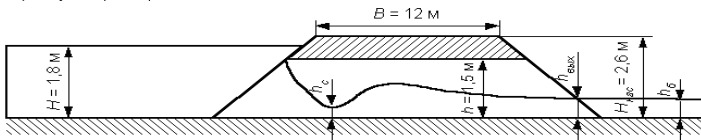
Требуется:

1. Подобрать диаметр трубы для пропуска расхода  $Q_{\text{max}}$  в напорном режиме при допустимой скорости движения воды в трубе  $v_{\text{доп}} = 4$  м/с и минимально допустимом расстоянии от бровки насыпи до подпорного уровня  $a_{\text{min}} = 0,5$  м.
2. Определить фактическую скорость движения воды в трубе  $v_{\text{ф}}$  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 полунапорных МАХ.

а) безнапорный режим



б) полунапорный режим



в) напорный режим

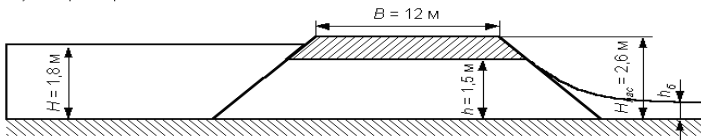


Рисунок 10

Исходные данные принять по таблице 7.

Таблица 7

Исходные данные	Номер вариантов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Уклон $i_n$	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,004	0,006	0,007	0,003	0,009
$Q_{\max}, \text{ м}^3/\text{с}$	4,5	6	8	3,9	5	3	2,8	1,7	10	5
$H_{\text{нас}}$	3	2,6	3,2	3,6	5	2,2	4,1	2,4	5,4	4

**Указания к решению задачи 7.** Водопропускные трубы под насыпями дорог (железных и автомобильных) служат для пропуска расходов воды периодически действующих водотоков во время ливневых или весенних паводков.

Чаще всего применяются водопропускные 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 диаметром: 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 (рисунок 10);
2. полунапорный, когда входное сечение трубы затоплено, то есть на входе труба работает полным сечением, а на остальном протяжении поток имеет свободную поверхность (рисунок 10);
3. напорный, когда труба работает полным сечением, то есть все поперечное сечение трубы по всей длине полностью заполнено водой (рисунок 10).

Напорный режим имеет место при одновременном выполнении трех условий:

входной оголовок должен быть обтекаемым;

$$H > 1,4 d;$$

$$i_t < i, \text{ где } i - \text{гидравлический уклон.}$$

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  $\mu$  определяется зависимостью

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

где  $\zeta_{\text{вх}}$  – коэффициент сопротивления на входе, для обтекаемых оголовков  $\zeta_{\text{вх}} = 0,2$ ;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического 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  $v_{\text{доп}}$ , 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  $d_{\text{ст}}$  (0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0 м), и вычисляется фактическая скорость движения воды

$$v_{\text{ф}} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{\text{ст}}^2} \quad (40)$$

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

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

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:  $H > 1,4 d$ ;

$H = (H_{\text{нас}} - 0,5)$  и  $i_{\text{т}} < i$ . 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,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$$K = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R}, \quad (45)$$

$C$  – коэффициент Шези,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ;  $C = n^{-1} R^{1/2}$ ,

где  $n$  – коэффициент шероховатости,  $n = 0,012$ .

Если условия для напорного режима не соблюдаются, то принимается двухчочковая труба. Считается, что расход по каждой трубе одинаков и равен  $Q/2$ .

По формуле (39) определяется диаметр трубы. Если двухчочковая труба не обеспечивает напорный режим, то принимается трехчочковая и так далее. Полунапорный режим бывает при условии  $H > 1,2 d$ . Пропускная способность полунапорных труб с учетом уклона дна определяется по формуле:

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

где  $\mu$  – коэффициент расхода, зависящий от типа оголовка (для условий данной задачи  $\mu = 0,7$ )

$\omega$  – площадь сечения трубы;

$d$  – диаметр отверстия трубы;  $i_{\text{т}}$  – 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:



$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot [1,4 \cdot d - (0,708 - 2 \cdot i_m) \cdot d]} \quad (47)$$

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:

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

где  $b_k$  – средняя ширина потока в сечении с критической глубиной (определяется по графику, представленному на рисунке 11),

$\mu$  – коэффициент расхода (принять  $\mu = 0,335$ ).

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

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

Для определения  $b_k$  вычисляется отношение

$$\frac{Q}{b_k} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (1,2 \cdot d)^{3/2}}, \quad (50)$$

затем находится значение безразмерного параметра

$$\frac{Q}{b_k \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d}}, \quad (51)$$

$$\frac{b_k}{d} = f\left(\frac{Q}{b_k \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d}}\right) \quad (52)$$

после чего по графику (рисунок 11) определяется соответствующая этому параметру величина  $b_k / d$ , по которой определяется значение  $b_k$

$$b_k = \left(\frac{b_k}{d}\right) \cdot d \quad (53)$$

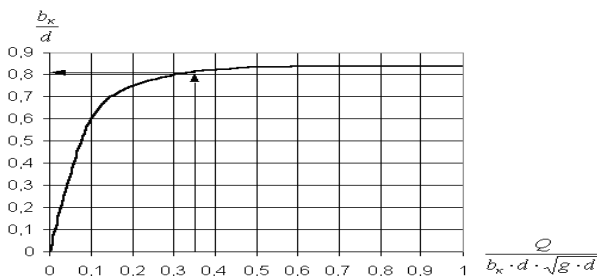


Рисунок 11

### **3 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

1 История развития дисциплины. Труды Архимеда, Леонардо да Винчи. Вклад в развитие науки Ньютона, Паскаля, Торичелли. Работы Ломоносова, Бернулли, Эйлера. Исследования Н.Жуковского. Наши современники и их вклад в развитие дисциплины.

2 Понятие «жидкость». Капельная, реальная, идеальная, упругая жидкость. Силы, действующие в жидкости.

3 Механические характеристики жидкости. Физические свойства капельной жидкости (сжимаемость, вязкость, поверхностное натяжение, температурное расширение, капиллярность, испаряемость, растворимость газов.)

4 Гидростатическое давление (ГД). Два основных свойства ГД (с доказательством).

5 Гидростатическое давление: атмосферное, избыточное, вакууметрическое, абсолютное.

6 Основное уравнение гидростатики (вывод). Закон Паскаля. Гидростатический парадокс. Героновы фонтаны, устройство, принцип действия.

7 Приборы, применяемые для измерения давления (атмосферного, избыточного, вакууметрического). Устройство, принцип действия. Класс точности приборов.

8 Дифференциальные уравнения покоящейся идеальной жидкости (Уравнения Л.Эйлера). Вывод уравнений, пример применения уравнений для решения практических задач.

9 Определение силы гидростатического давления на плоскую стенку, расположенную под углом к горизонту. Центр давления. Положение центра давления в случае прямоугольной площадки, верхняя кромка которой лежит на уровне свободной поверхности.

10 Определение силы гидростатического давления на криволинейную поверхность. Эксцентриситет. Объем тела давления.

11 Закон Архимеда. Вывод уравнения для определения Архимедовой силы. Центр водоизмещения. Условия плавания и остойчивости тела. Метацентр. Метацентрическая высота. Ватерлиния. Осадка. Запас плавучести.

12 Виды движения жидкости (установившееся, неустановившееся, равномерное, неравномерное, напорное, безнапорное). Элементы потока жидкости (линия тока, поверхность тока, трубка тока, элементарная струйка, площадь живого сечения).

13 Понятие расхода жидкости. Определение скорости осредненной по живому сечению.

- 14 Уравнение неразрывности потока. Вывод уравнения. Применение уравнения к решению практических задач.
- 15 Уравнение Д.Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.
- 16 Геометрический смысл уравнения Бернулли. Энергетический смысл уравнения Бернулли. Полный напор. Напорная и пьезометрическая линии.
- 17 Гидравлические элементы живого сечения (площадь живого сечения, длина смоченного периметра, гидравлический радиус). Два режима движения жидкости (ламинарный и турбулентный).
- 18 Опыты О.Рейнольдса. Критические числа Рейнольдса. Определение числа Рейнольдса.
- 19 Потери напора. Определение потерь напора по длине при ламинарном режиме движения. Вывод уравнения Пуазейля. Закон Пуазейля.
- 20 Уравнение Вейсбаха-Дарси. Коэффициент Дарси (коэффициент гидравлического трения) в случае ламинарного движения.
- 21 Определение коэффициента Дарси при турбулентном режиме движения. Коэффициент эквивалентной шероховатости.
- 22 Гидравлически гладкие и шероховатые трубы.
- 23 Уравнения для определения коэффициента Дарси в случае области гладкого трения, доквадратичного и квадратичного сопротивления.
- 24 Графики Никурадзе. Определение коэффициента Дарси опытным путем.
- 25 Графики Мурина. Определение коэффициента Дарси опытным путем.
- 26 Виды местных сопротивлений. Определение потерь напора на местные сопротивления. Вывод общего уравнения Вейсбаха.
- 27 Определение коэффициентов местных сопротивлений для внезапного и плавного расширения, внезапного и плавного сужения, поворота трубы на  $90^\circ$ .
- 28 Явление кавитации. Критическое число кавитации.
- 29 Уравнение Д.Бернулли для потока реальной жидкости. 30 Пьезометрический и гидравлический уклон. Геометрический и энергетический смысл уравнения.
- 31 Дифференциальные уравнения движущейся идеальной жидкости (уравнения Л.Эйлера). Вывод уравнений.
- 32 Определение скорости и расхода при истечении жидкости через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном расходе.
- 33 Коэффициенты сжатия, скорости и расхода. Уравнение Торичелли.
- 34 Истечение жидкости под уровень через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре.

- 35 Определение времени опорожнения сосуда.
- 36 Вывод уравнения траектории струи. Определение дальности отлета струи.
- 37 Истечение жидкости через насадки. Устройство и принцип действия насадка Вентури, Борда, расходящегося и сходящегося внешних насадков. Определение расхода и скорости.
- 38 Коэффициенты сжатия, скорости и расхода насадков. Уравнения для определения скорости и расхода насадка.
- 39 Явление гидравлического удара. Скорость распространения ударной волны (формула Н.Жуковского).
- 40 Определение превышения давления в трубопроводе при гидроударе. Фаза и период гидроудара. Прямой и не прямой гидроудар. Определение превышения давления.
- 41 Устойчивость и принцип действия гидротарана (достоинства и недостатки).
- 42 Способы борьбы с возникновением гидроудара в трубопроводе.
- 43 Гидравлический расчет трубопроводов. Трубопроводы простые и сложные, короткие и длинные.
- 44 Построение трубопроводной характеристики. Статический напор, потребный напор.
- 45 Построение трубопроводной характеристики при параллельном и последовательном соединении коротких трубопроводов.
- 46 Расчет длинных трубопроводов. Определение магистральной. Понятие коэффициента расхода.
- 47 Построение трубопроводной характеристики в случае тупикового трубопровода.
- 48 Выбор насоса, работающего на трубопроводную систему. Построение трубопроводной характеристики. Определение потребного напора. Поле насосов. Характеристики насоса. Определение рабочей точки насоса.
- 49 Основы теории подобия. Геометрическое, кинематическое и динамическое подобие. Критерии подобия: числа Рейнольдса, Вебера, Струхалея, Маха, Фруда, Эйлера, Ньютона.
- 50 Равномерное установившееся движение воды в открытом русле.
- 51 Основные понятия и определения. Основное уравнение равномерного движения. Коэффициент Шези.
- 52 Определение гидравлических элементов живого сечения для различных форм поперечного сечения.
- 53 Гидравлически наиболее выгодное сечение трапециевидного канала. Коэффициент гидравлически наиболее выгодного сечения.
- 54 Ограничение скоростей движения воды при расчете канала. Неразмывающая и незаилающая скорость. Мероприятия по

увеличению максимальной неразмывающей и минимальной незаиляющей скорости.

55 Установившееся неравномерное движение воды в открытом призматическом русле. Основные понятия и определения.

56 Составление основного дифференциального уравнения неравномерного установившегося движения воды. Первый вид уравнения.

57 Удельная энергия потока в поперечном сечении. График зависимости удельной энергии сечения от глубины.

58 Понятие критической глубины. Определение критической глубины для различных форм поперечного сечения. Бурное и спокойное движение.

59 Понятие нормальной глубины. Определение нормальной глубины. Модуль расхода.

60 Понятие критического уклона. Вывод уравнения для определения критического уклона.

61 Второй вид дифференциального уравнения неравномерного установившегося движения. Гидравлический показатель русла. Относительные глубины.

62 Третий вид дифференциального уравнения неравномерного установившегося движения. Интегрирование уравнения методом Б.А. Бахметева. Функции Бахметева.

63 Форма свободной поверхности потока при неравномерном установившемся движении. Кривые спада и подпора. Гидравлические оси.

64 Гидравлический прыжок. Виды прыжков. Геометрия гидравлического прыжка.

65 Высота, длина гидравлического прыжка, сопряженные глубины.

66 Основное уравнение гидравлического прыжка. График прыжковой функции.

67 Определение сопряженных глубин при помощи графика прыжковой функции.

68 Определение сопряженных глубин в случае прямоугольного русла.

69 Определение потери энергии в гидравлическом прыжке в случае прямоугольного русла.

70 Водосливы. Основные понятия и определения. Геометрия водосливов.

71 Скорость подхода, геометрический напор, порог водослива.

72 Классификация водосливов. Определение расхода через водосливную стенку.

73 Расчет разнообразных водосливов.

74 Сопряжение бьефов за гидротехническими сооружениями.

- 75 Гашение энергии гидравлического прыжка. Водобойная стенка.
- 76 Водобойный колодец. Пирсы.
- 77 Движение грунтовых вод. Классификация грунтовых вод.
- 78 Равномерное, неравномерное, напорное и безнапорное движение грунтовых вод. Водоупор, кривая депрессии.
- 79 Определение скорости фильтрации в случае равномерного движения. Уравнение Дарси.
- 80 Определение скорости фильтрации в случае неравномерного движения грунтовых вод. Уравнение Дюпюи.
- 81 Определение коэффициента Дарси лабораторным способом.
- 82 Определение коэффициента Дарси полевым способом. Определение коэффициента фильтрации при помощи уравнений.
- 83 Фильтрационные потоки под бетонными сооружениями. Построение гидродинамической сетки.
- 84 Метод электрогидродинамических аналогий.

#### **4 ЗАДАНИЕ НА СУРС**

Для самостоятельного изучения предлагаются следующие темы раздела 2.

1. Доказательство второго основного свойства гидростатического давления.
2. Вывод уравнения для определения: силы гидростатического давления на площадку, расположенную под углом к горизонту и координаты центра давления.
3. Вывод уравнения для определения силы гидростатического давления на криволинейную поверхность и координат точки ее приложения.
4. Вывод уравнения для определения выталкивающей силы (Закон Архимеда).
5. Вывод дифференциального уравнения для покоящейся идеальной жидкости (Уравнение Эйлера).
6. Вывод уравнения неразрывности движения .
7. Вывод уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости .
8. Определение расхода при истечении через малое отверстие в тонкой стенке и под уровень при постоянном напоре.
9. Определение времени опорожнения резервуара при переменном напоре.
10. Вывод уравнения Вейсбаха-Дарси.
11. Вывод общего уравнения Вейсбаха .
12. Определение скорости распространения ударной волны (Вывод формулы Н.Жуковского). (1 час).

13. Вывод дифференциальных уравнений для движущейся идеальной жидкости (Уравнения Эйлера) (1 час).
14. Составление дифференциального уравнения неравномерного установившегося движения (ДУНД) воды в открытом русле (1 час).
15. Составление основного уравнения гидравлического прыжка. (1 час.)
16. Решение (ДУНД) методом Бахметева Б.А. (2 часа).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

*Таблица А.1 – Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры*

t, °С	5	10	15	20	25	30
P <sub>н.п.</sub> , кПа	0,9	1,2	1,8	2,4	2,4	4,3

*Таблица А.2 – Зависимость коэффициента кинематической вязкости воды от температуры*

t, °С	0	5	7	10	12
$\nu, \frac{см^2}{с}$	0,0179	0,0152	0,0143	0,0131	0,0124
t, °С	15	17	20	25	30
$\nu, \frac{см^2}{с}$	0,0114	0,0109	0,0101	0,009	0,008

*Таблица А.3 – Эквивалентная шероховатость для труб из различного материала*

Материал трубопровода	Эквивалентная шероховатость $\Delta_э$ , мм
Стекло	0
Трубы, тянутые из латуни, свинца, меди	0...0,002
Высококачественные бесшовные стальные трубы	0,06...0,2
Стальные трубы	0,1...0,5
Чугунные асфальтированные трубы	0,1...0,2
Чугунные трубы	0,2...1,0

*Таблица А.4 – Значения коэффициента гидравлического трения и модуля расхода для круглых труб, рассчитанные по формуле Павловского Н.Н. при коэффициенте шероховатости  $n = 0,012$*

d, мм	50	75	100	150	200	250	300	350	400
$\lambda$	0,0391	0,0349	0,0321	0,0286	0,0263	0,0247	0,0334	0,0224	0,0216
K, $м^3/с$	0,0098	0,0287	0,0614	0,1794	0,3837	0,6921	1,1206	1,6842	2,3970



*ПРИЛОЖЕНИЕ Б*

**Образец оформления обложки к контрольной работе № 1, №2**

**Министерство образования Республики Беларусь  
Белорусский государственный университет транспорта**

**Кафедра «Экология и рациональное использование  
водных ресурсов»**

**Контрольная работа № 1, №2  
по дисциплине  
«Гидравлика, гидрология и гидрометрия водотоков»**

**Выполнил студент  
группы ЗСж – 41  
Иванов А.П.  
Учебный шифр ЗСж – 262**

**Принял преподаватель  
к.т.н., доцент Вострова Р.Н.**

**Индекс и домашний адрес:  
246004 г. Гомель,  
ул.Привокзальная, д.б., кв.15.**

**Гомель  
2005**

## *ПРИЛОЖЕНИЕ В* *(обязательное)*

### **Базовая программа дисциплины «Гидравлика, гидрология и гидрометрия водотоков»**

#### Введение

Дисциплина "Гидравлика, гидрология и гидрометрия водотоков" - одна из фундаментальных дисциплин общетехнического цикла служит основой для изучения профилирующих дисциплин строительных специальностей.

Целью преподавания дисциплины является получение студентами знаний в области гидравлики, гидрологии и гидрометрии, изучение основных законов покоящейся и движущейся жидкости и их применения для решения практических задач.

Задачей изучения дисциплины является приобретение знаний в области статики жидкости, динамики жидкости в случае напорного движения жидкости в трубопроводах и открытых руслах, а также в случае фильтрационных процессов в грунтах; изучение гидрологии суши и русловых процессов, а также исследование методов по измерению параметров водотоков.

Преподавание дисциплины должно основываться на изучении студентами следующих курсов:

1. математики (разделы): векторная алгебра, дифференциальное и интегральное исчисление, численные методы интегрирования,
2. теоретическая механика (разделы): статика, кинематика, динамика,
3. инженерной графики: построение линий пересечения поверхностей,
4. информатики: использование методов прикладной математики и стандартных программ МATHCAD при решении инженерных задач.

Настоящая программа является базовой, определяющей общее содержание дисциплины. Планом предусмотрено изучение дисциплины в шестом семестре. Кроме лекционного курса запланировано проведение лабораторных работ и практических занятий и выполнение двух РГР.

#### Содержание дисциплины

История возникновения предмета. Вклад ученых Архимеда, Паскаля, Ньютона, Торричелли, Бернулли, Эйлера, Рейнольдса, Шези, Вентури, Базена, Бахметева, Ломоносова, Жуковского, Колмогорова, Железнякова, Леви, Гуржиенко, Железнякова и др. в развитие науки. Методика современных исследований.

Понятие "жидкость". Свойства жидкости: плотность, удельный вес, относительная плотность, вязкость, текучесть, сжимаемость, капиллярность,

растворимость газов, поверхностное натяжение, температурное расширение, сопротивление растяжению. Капиллярная, упругая, идеальная и реальная жидкость. Силы, действующие в жидкости: массовые и поверхностные. Единичная массовая сила. Аномалии воды.

### ГИДРОСТАТИКА ЖИДКОСТИ

Гидростатическое давление. Единицы измерения давления. Атмосферное, избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давление. Техническая и физическая атмосфера. Свойства гидростатического давления. Вывод основного уравнения гидростатики. Закон Паскаля. Гидростатический парадокс. Героновы фонтаны. Приборы для измерения гидростатического давления. Металлический манометр, пьезометр, микроманометр, вакуумметр. Класс точности прибора, относительная и приведенная погрешность. Достоинства и недостатки приборов.

Дифференциальные уравнения идеальной покоящейся жидкости (уравнения Эйлера). Определение силы давления жидкости на плоскую площадку, расположенную под углом  $\alpha$  к горизонту. Определение модуля силы, направления и линии действия. Центр давления. Определение центра давления в случае прямоугольной площадки, одна сторона которой лежит на линии свободной поверхности.

Определение силы гидростатического давления на криволинейную поверхность. Определение горизонтальной и вертикальной составляющей силы, направления и линии действия. Объем тела давления. Эксцентриситет. Определение толщины стенки трубопровода. Вывод закона Архимеда. Архимедова сила. Условия плавания и устойчивости тела. Центр водоизмещения, ватерлиния, плавучесть тела. Плоскость плавания, ось плавания, осадка. Метацентр. метацентрическая высота.

### ГИДРОДИНАМИКА ЖИДКОСТИ

Виды движения жидкости: установившееся и неустановившееся, равномерное и неравномерное, напорное и безнапорное. Элементы потока жидкости: линия тока, поверхность тока, трубка тока, элементарная струйка. Нормальное (живое) сечение.

Площадь живого сечения. Расход воды: объемный, массовый, весовой. Средняя и мгновенная скорость движения жидкости. Уравнение неразрывности движения жидкости, уравнение неразрывности потока (вывод).

Вывод уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.

Геометрический смысл уравнения Бернулли. Геометрический, пьезометрический и скоростной напор. Полный напор, единица измерения. Использование трубки Пито для определения скоростного напора.

Пьезометрическая и напорная линии. Энергетический смысл уравнения Бернулли. Полная удельная энергия единицы веса жидкости.

Уравнения Эйлера для элементарной струйки идеальной движущейся жидкости. Гидравлические элементы живого сечения. Гидравлический радиус. Длина смоченного периметра.

Два режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный.

Опыты О.Рейнольдса. Нижний критический предел числа Рейнольдса. переходная область. Потери напора на гидравлическое трение при ламинарном режиме движения. Коэффициент Дарси. Вывод уравнения Пуазейля. Получение уравнения Вейсбаха-Дарси.

Случаи, когда теория определения коэффициента Дарси при ламинарном движении требует корректировки. Начальный участок ламинарного движения, движение в зазоре, движение с теплообменом, движение с большими перепадами давления.

Определение коэффициента Дарси в случае турбулентного движения жидкости. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы, Эквивалентная шероховатость. Область гладкого, вязкого трения, доквадратичная и квадратичная область сопротивления. Графики Никурадзе-Мурина.

Потери напора на местные сопротивления. Вывод уравнения Борда. Коэффициент местного сопротивления. Общее уравнение Вейсбаха. Коэффициенты местного сопротивления для различных сопротивлений. Явление кавитации, число кавитации. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Пьезометрический и гидравлический уклоны. Частный случай закона сохранения энергии.

Истечение жидкости через отверстия и насадки. Определение расхода и скорости истечения. Истечение через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре. Коэффициенты скорости, сжатия и расхода. Истечение под уровень. Определение времени опорожнения резервуара. Истечение через насадки. Насадки Вентури, Борда. Коноидальный насадок. Определение скорости и расхода при истечении через насадки.

Явление гидравлического удара. Модель гидроудара. Прямая и обратная ударная волна. Фаза и период гидроудара. Прямой и непрямой гидроудар. Определение превышения давления при прямом и непрямом гидроударе. Формула Н.Жуковского. Мероприятия по предотвращению гидроудара. Гидравлический таран.

Трубопроводы простые и сложные, короткие и длинные. Построение трубопроводной характеристики.

Построение трубопроводной характеристики в случае последовательного соединения трубопроводов. Построение трубопроводной характеристики в случае параллельного соединения трубопроводов.

Выбор насоса, работающего на трубопроводную систему. Основы теории подобия. Геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

Критериальные числа. Критерии Ньютона, Вебера, Струхала, Фруда, Рейнольдса.

## ГИДРАВЛИКА ОТКРЫТОГО РУСЛА

Установившееся безнапорное равномерное движение воды в каналах.

Основное уравнение равномерного движения. Коэффициент Шези. Гидравлические элементы поперечного сечения канала. Гидравлически наивыгоднейшее сечение канала.

Определение коэффициента гидравлически наивыгоднейшего трапециевидального сечения канала.

Основные задачи при расчете канала трапециевидального сечения. Ограничение скоростей движения воды при расчете канала.

Расчет каналов с составным профилем. Расчет канализационных труб. Расчет дренажных труб. Коэффициенты и модули расхода и скорости. Таблицы Гангилье-Куттера.

Установившееся неравномерное движение воды в открытом призматическом русле. (4 часа)

Основные понятия и определения. Составление основного дифференциального уравнения неравномерного установившегося движения (ДУНУД). Первый вид уравнения. Понятие удельной энергии потока. График зависимости удельной энергии от глубины потока

Понятие критической и нормальной глубины. Определение критической глубины в случае прямоугольного сечения русла. Определение критической и нормальной глубины графо-аналитическим способом. Критический уклон. Определение гидравлических осей.

Гидравлический показатель русла. Решение дифференциального уравнения неравномерного установившегося движения воды методом Б.А.Бахметева. Форма свободной поверхности потока в случае неравномерного установившегося движения.

Явление водослива. Основные понятия и определения. Классификация водосливов. Коэффициент расхода водослива. Определение расхода водослива. Водомерные лотки. Лоток Вентури, лоток Паршалля.

Гидравлический прыжок. Понятия и определения. Геометрия прыжка. Основное уравнение гидравлического прыжка.

График прыжковой функции. Определение сопряженных глубин в случае прямоугольного сечения русла. Потеря энергии в прыжке.

## ДВИЖЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

Сопряжение бьефов за гидротехническим сооружением. Гасители энергии гидравлического прыжка. Водобойная стенка, водобойный колодец, комбинированный колодец, пирсы. Расчет водобойной стенки и водобойного колодца.

Движение грунтовых вод. Классификация грунтовых вод. Равномерное движение фильтрационного потока. Определение скорости и расхода в случае равномерного движения. Формула Дарси.

Коэффициент фильтрации. Определение коэффициента фильтрации лабораторным, полевым способом и при помощи полуэмпирических уравнений. Неравномерное установившееся движение грунтовых вод. Формула Дюпюи. Форма кривых депрессии. Напорная фильтрация под бетонным сооружением. Построение гидродинамической сетки. Метод электрогидродинамический аналогий.

Определение дебита колодца с притоком грунтовых вод. Абсорбирующий колодец. Определение дебита артскважины.

## ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОМЕТРИЯ ВОДОТОКОВ

Основы общей гидрологии суши. Общие сведения о реках. Речные системы. Речная долина и русло. Питание и водный режим рек.

Режим движения речного потока. Циркуляционные течения в русле.

Теория наносов и русловые процессы. Транспортирующая способность потока. Уравнение Эри. Расчет расходов наносов. Русловые процессы. Русловые деформации. Наносные образования в русле.

Измерение уровней воды. Водомерные посты. Производство водомерных наблюдений. Наблюдения за ледовыми явлениями.

Промерные работы. Приборы для измерения глубины. Построение плана участка водного объекта в изобатах. Измерение скоростей течения. Приборы для определения скоростей и направления течения. Поплавочные наблюдения. Построение плана течения.

### Практические занятия

1. Гидростатика. Решение задач по определению гидростатического давления (абсолютного, избыточного, вакуумметрического). Исследования свойств жидкости. Решение задач.
2. Закон Паскаля. Решение задач с использованием закона Паскаля.
3. Определение силы гидростатического давления на плоскую стенку, расположенную под углом к горизонту. Решение задач. Построение эпюры гидростатического давления. Определение центра давления.
4. Определение равнодействующей силы гидростатического давления на криволинейную поверхность. Определение вертикальной и горизонтальной составляющей силы гидростатического давления. Понятие эксцентриситета. Объем тела давления. Решение задач. Построение эпюры гидростатического давления.
5. Закон Архимеда. Определение выталкивающей силы. Метацентр, метацентрическая высота. Решение задач.

6. Гидродинамика. Основное уравнения неразрывности потока. Решение задач. Уравнение Бернулли для идеальной жидкости. Решение задач.
7. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Потери напора по длине.
8. Уравнение Вейсбаха-Дарси. Потери напора на местные сопротивления. Общее уравнение Вейсбаха. Решение задач. Построение напорной и пьезометрической линии.
9. Равномерное движение воды в открытом русле. Основное уравнение равномерного движения. Определение параметров поперечного сечения канала. Решение задач.
10. Неравномерное установившееся движение воды в открытом призматическом русле. Основное дифференциальное уравнение неравномерного установившегося движения. Решение задач по определению нормальной и критической глубины.
11. Решение дифференциального уравнения неравномерного установившегося движения воды методом Б.А. Бахметева. Определение гидравлического показателя русла, критического уклона. Определение форм кривых свободной поверхности.
12. Построение линии свободной поверхности воды при неравномерном установившемся движении методом Бахметева. Применение метода пошагового интегрирования для решения задачи.
13. Определение сопряжения бьефов за гидротехническим сооружением. 3.13 Расчет гасителей энергии гидравлического прыжка. Расчет водобойного колодца и водобойной стенки.
14. Итоговое занятие.

#### Лабораторные работы

1. Определение гидростатического давления.
2. Исследование относительного покоя жидкости.
3. Определение режимов движения жидкости в трубопроводе.
4. Опытная проверка уравнения Бернулли.
5. Определение потерь напора по длине водопровода.
6. Определение местных потерь напора при движении воды в трубах.
7. Истечение жидкости через отверстия и насадки.
8. Изучение гидравлического удара в напорном трубопроводе.
9. Исследование кривой свободной поверхности воды в открытом прямоугольном русле с горизонтальным дном при неравномерном движении.
10. Исследование гидравлического прыжка.
11. Определение коэффициента расхода водосливов.

12. Исследование форм сопряжения бьефов за гидротехническим сооружением и методов воздействия на них.
13. Определение коэффициента фильтрации грунта.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 *Железняков Г.В.* Гидравлика и гидрология. М.: Транспорт, 1989. – 375 с.
- 2 *Угинчус А.А., Чугаева Е.А.* Гидравлика. Л.: Стройиздат, 1971. -350 с.
- 3 *Писарик М.Н.* Лабораторные работы по гидравлике. Гомель: БелГУТ, 1993. - 59 с.
- 4 Справочник по гидравлике./ Под ред. *В.А. Большакова.* Киев: Вища школа, 1977. - 280 с.
- 5 *Киселев П.Г.* справочник по гидравлическим расчетам. Л.: 1961. – 352 с.
- 6 Примеры расчетов по гидравлике./ Под ред. *А.Д. Альтиуля.* М.: Стройиздат, 1976. -255 с.
- 7 *Богомолов А.И.* Примеры гидравлических расчетов. М.: 1969. – 575 с.
- 8 *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. Л.: Энергия, 1975. – 599 с.
- 9 *Шевелев Ф.А., Шевелева А.Ф.* Таблицы гидравлического расчета водопроводных труб. М.: Стройиздат, 1984. -112 с.



