

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
«КОЛЛЕДЖ КУЛЬТУРЫ И СПОРТА»

**ПРАКТИКУМ  
И  
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

**ОП.06 Гидравлика, гидрология, гидрометрия**

Специальность: 08.02.02 Строительство и эксплуатация  
инженерных сооружений

Москва, 2024

## Содержание

№	Название практического занятия	стр.
<b>РАЗДЕЛ 1. ГИДРАВЛИКА</b>		4
<b>Тема 1.1. Гидростатика</b>		4
1	<b>Практическое занятие №1.</b> Примеры решения задач по основным свойствам жидкости и гидростатике.	4
<b>Тема 1.2. Гидродинамика</b>		6
1	<b>Практическое занятие №2.</b> Примеры решения задач по уравнению Бернулли.	6
2	<b>Практическое занятие №3.</b> Примеры решения задач по определению режима движения жидкости с помощью числа Рейнольдса.	
3	<b>Практическое занятие №4.</b> Примеры решения задач по движению жидкости в напорных трубопроводах.	
4	<b>Практическое занятие №5.</b> Примеры решения задач по движению жидкости в безнапорных трубопроводах	
5	<b>Практическое занятие №6.</b> Примеры решения задач по основному уравнению установившегося равномерного движения жидкости.	
<b>РАЗДЕЛ 3. ГИДРОМЕТРИЯ</b>		15
<b>Тема 3.1. Измерение уровней, глубин и скоростей воды в водотоке</b>		
1	<b>Практическое занятие №7.</b> Определение гидрологических параметров, построение поперечного профиля водоема.	15
<b>Тема 3.2. Гидрологические расчеты</b>		24
1-2	<b>Практические занятия №№8-9.</b> Гидрометрические расчеты при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений.	24

## Практическое занятие №1

### Примеры решения задач по основным свойствам жидкости

**Цель работы:** научиться решить основные типы задач по теме.

#### Примеры решения задач

##### Пример 1.

Нефть весом 90 кгс занимает объём 105 см<sup>3</sup>. Определить плотность и удельный вес этой нефти в трёх системах единиц (СИ, МКГСС, СГС).

##### Решение.

Для определения плотности нефти воспользуемся формулой:

$$\gamma = \rho g, \text{ отсюда } \rho = \gamma / g.$$

Удельный вес определим по формуле (1.1):  $\gamma = G / W$ .

Для определения искомых величин в заданной системе единиц измерения необходимо помнить:

$$90 \text{ кгс} = 90 \cdot 9,81 \text{ Н} = 90 \cdot 9,81 \cdot 10^5 \text{ дин};$$

$$10^5 \text{ см}^3 = 10^5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$\gamma_{\text{СИ}} = 90 \cdot 9,81 / (10^5 \cdot 10^{-6}) = 8829 \text{ Н/м}^3.$$

$$\rho_{\text{СИ}} = 8829 / 9,81 = 900 \text{ Нс}^2 / \text{м}^4 = 900 \text{ кг/м}^3.$$

$$\gamma_{\text{МКГСС}} = 90 / (10^5 \cdot 10^{-6}) = 900 \text{ кгс/м}^3.$$

$$\rho_{\text{МКГСС}} = 900 / 9,81 = 91,7 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4.$$

$$\gamma_{\text{СГС}} = 90 \cdot 9,81 \cdot 10^5 / 10^5 = 882,9 \text{ дин/см}^3.$$

$$\rho_{\text{СГС}} = 882,9 / (9,81 \cdot 10^2) = 0,9 \text{ дин} \cdot \text{с}^2 / \text{см}^4.$$

##### Пример 2.

Трубопровод диаметром  $d = 250$  мм и длиной  $L = 1$  км заполнили водой при атмосферном давлении. Определить, какой объём воды необходимо добавить в трубопровод, чтобы давление в нём повысилось до 70 ат? Деформацией стенок трубопровода пренебречь.

##### Решение.

Для определения необходимого объёма  $\Delta W$  воспользуемся формулой, откуда  $\Delta W = \beta W \Delta p / W$ .

Для воды  $\beta W = 1 / (20 \cdot 10^8) \text{ м}^2 / \text{Н}$ .

Изменение давления в трубопроводе равно

$$\Delta p = 70 - 1 = 69 \text{ ат} = 69 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Первоначальный объём воды в трубопроводе равен

$$W = (\pi d^2 / 4) L, \text{ где } d = 250 \text{ мм} = 0,25 \text{ м}, L = 1 \text{ км} = 1000 \text{ м}.$$

$$\text{Тогда } \Delta W = 69 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 \cdot 1000 / (20 \cdot 10^8 \cdot 4) \approx 0,16 \text{ м}^3.$$

##### Пример 3.

При температуре 288 К плотность нефти равна 828 кг/м<sup>3</sup>. При температуре 295 К условная вязкость нефти равна 6,4 °Е. Коэффициент температурного расширения нефти  $\beta_t = 0,00072$  1/К. Определить динамическую вязкость нефти при температуре 295 К.

##### Решение.

Динамическую вязкость можно определить из формулы:

$$\mu_{295} = \nu_{295} \cdot \rho_{295}.$$

Кинематическая вязкость определяется по формуле

$$\nu_{295} = 0,0731 \cdot 6,4 - 0,0631 / 6,4 = 0,458 \text{ см}^2 / \text{с} = 0,458 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Плотность нефти при температуре 295 К можно определить по формулам:

$$W_{288} = \rho_{288} / m.$$

$$\Delta W = W_{288} - W_{295} = m / \rho_{288} - m / \rho_{295} = m \cdot (\rho_{295} - \rho_{288}) / \rho_{288} \cdot \rho_{295}.$$

$$\beta_t = \Delta W / \Delta t \cdot W = m \cdot (\rho_{295} - \rho_{288}) \cdot \rho_{288} / \Delta t \cdot m \cdot \rho_{288} \cdot \rho_{295} = \rho_{295} - \rho_{288} / \Delta t \cdot \rho_{295}$$

$$\rho_{295} = \rho_{288} / 1 - \beta_t \cdot \Delta t = 828 / 1 - 0,00072 \cdot (288 - 295) = 823,85 \text{ кг/м}^3.$$

$$\mu_{295} = 0,458 \cdot 10^{-4} \cdot 823,85 = 0,0377 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2.$$

**Необходимо решить самостоятельно:**

**Задача 1.** Определить плотность нефти, если 320 000 кг её массы помещаются в объёме 380 м<sup>3</sup>.

Ответ: 842 кг/м<sup>3</sup>.

**Задача 2.** Определить объём, занимаемый 125 000 кг нефти, если её плотность равна 850 кг/м<sup>3</sup>.

Ответ: 147 м<sup>3</sup>.

**Задача 3.** Определить удельный вес и плотность жидкости, если её объём  $W = 104 \text{ см}^3$  имеет вес  $G = 8,3 \text{ кгс}$ . Решение привести в трёх системах единиц: международной – СИ, технической – МКГСС, физической – СГС.

Ответ:  $\gamma_{\text{СИ}} = 8142,3 \text{ Н/м}^3$ ;  $\rho_{\text{СИ}} = 830 \text{ кг/м}^3$ ;  $\gamma_{\text{T}} = 830 \text{ кгс/м}^3$ ;  $\rho_{\text{T}} = 84,6 \text{ кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$ ;  
 $\gamma_{\text{Ф}} = 846 \text{ дин/см}^3$ ;  $\rho_{\text{Ф}} = 0,86 \text{ г/см}^3$ .

**Задача 4.** Определить потребное число бочек для транспортировки трансформаторного масла весом 117 кН и плотностью 900 кг/м<sup>3</sup>, если объём одной бочки  $W_{\text{б}} = 1,2 \text{ м}^3$ .

Ответ: 10 шт.

**Задача 5.** Определить плотность битума, если 470 кН его занимают объём  $W = 50 \text{ м}^3$ .

Ответ: 940 кг/м<sup>3</sup>.

**Задача 6.** При гидравлическом испытании трубопровода длиной 600 м и диаметром 500 мм давление воды поднято от 1 ат до 50 ат. Какой объём воды потребовалось подать в трубопровод за время подъёма давления? Расширением стенок трубы пренебречь.

Ответ: 0,26 м<sup>3</sup>.

**Задача 7.** Сосуд, объём которого 2,0 м<sup>3</sup>, заполнен водой. На сколько уменьшится и чему станет равным объём воды при увеличении давления на 20 000 кПа? Модуль объёмной упругости воды принять равным  $1962 \cdot 10^6 \text{ Па}$ .

Ответ: 0,02 м<sup>3</sup>; 1,98 м<sup>3</sup>.

**Задача 8.** При испытании прочности резервуара гидравлическим способом он был заполнен водой при давлении  $50 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . В результате утечки части воды через неплотности, давление в резервуаре понизилось до  $11,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Пренебрегая деформацией стенок резервуара, определить объём воды, вытекшей за время испытания. Объём резервуара равен 20 м<sup>3</sup>.

Ответ: 0,04 м<sup>3</sup>.

**Задача 9.** Кинематическая вязкость воды при температуре 15 °С равна 0,0115 Ст. Определить динамическую вязкость жидкости в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ:  $\mu_{\text{СИ}} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

**Задача 10.** Удельный вес бензина 720 кгс/м<sup>3</sup>. Определить плотность этого бензина в международной, технической и физической системах единиц. Ответ:  $\rho_{\text{СИ}} = 720 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 11.** Определить удельный вес и плотность жидкости, если её вес 90 кгс и объём 105 см<sup>3</sup>. Решение дать в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ:  $\gamma_{\text{СИ}} = 8829 \text{ Н/м}^3$ ;  $\rho_{\text{СИ}} = 900 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 12.** Плотность нефти 0,86 г/см<sup>3</sup>. Определить плотность и удельный вес этой нефти в международной и технической системах единиц.

Ответ:  $\gamma_{\text{СИ}} = 8436,6 \text{ Н/м}^3$ ;  $\rho_{\text{СИ}} = 860 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 13.** Удельный вес бензина 7000 Н/м<sup>3</sup>. Определить плотность и удельный вес этого бензина в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ:  $\rho_{\text{СИ}} = 740 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 14.** В резервуар, содержащий 125 м<sup>3</sup> нефти плотностью 760 кг/м<sup>3</sup>, закачано 224 м<sup>3</sup> нефти плотностью 848 кг/м<sup>3</sup>. Определить плотность смеси в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ:  $\rho_{\text{сн}} = 816 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 15.** В резервуар залито  $15 \text{ м}^3$  жидкости плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$ . Сколько необходимо долить такой же жидкости (однородной), но плотностью  $824 \text{ кг/м}^3$ , чтобы в резервуаре образовалась смесь плотностью  $814 \text{ кг/м}^3$ ?

Ответ:  $21 \text{ м}^3$ .

**Задача 16.** Стальной толстостенный баллон, объём которого  $36 \text{ дм}^3$ , заполнен нефтью и плотно закрыт при атмосферном давлении. Какое количество нефти необходимо закачать в баллон дополнительно, чтобы давление в нём повысилось в 25 раз? Модуль объёмной упругости нефти равен  $1325 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Деформацией стенок баллона пренебречь.

Ответ:  $65 \text{ см}^3$ .

**Задача 17.** Сосуд ёмкостью 32 л заполнен жидкостью при атмосферном давлении. Вычислить объём жидкости, который необходимо закачать в сосуд для того, чтобы избыточное давление в нём было равно 10 атм. Деформациями стенок сосуда пренебречь. Модуль объёмной упругости для жидкости принять равным  $13\,500 \text{ кгс/см}^2$ .

Ответ:  $0,24 \text{ м}^3$ .

**Задача 18.** Один кубический метр нефти имеет массу 0,92 т. Вычислить удельный вес и плотность нефти в физической и технической системах единиц.

Ответ:  $\rho_{\text{ф}} = 0,92 \text{ г/см}^3$ ;  $\rho_{\text{т}} = 920 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 19.** В резервуар залито 20 000 л нефти плотностью  $850 \text{ кг/м}^3$  и  $25 \cdot 10^3 \text{ л}$  плотностью  $840 \text{ кг/м}^3$ . Определить плотность смеси.

Ответ:  $844,4 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 20.** В резервуар залито 27 400 л нефти с удельным весом  $840 \text{ кгс/м}^3$  и 18 900 л нефти с неизвестным удельным весом. Полученная смесь имеет удельный вес  $860,4 \text{ кгс/м}^3$ . Вычислить неизвестный удельный вес.

Ответ:  $890 \text{ кгс/м}^3$ .

**Задача 21.** Определить кинематическую и динамическую вязкость при плотности жидкости  $0,9 \text{ г/см}^3$ . Показания вискозиметра по Энглера  $40^\circ$ .

Ответ: 2,92 Ст; 2,63 П.

**Задача 22.** Кинематическая вязкость нефти 0,4 Ст, а удельный вес равен  $9000 \text{ Н/м}^3$ . Определить динамическую вязкость нефти в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ:  $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ П}$ .

**Задача 23.** Вязкость нефти, определённая при помощи прибора Энглера, равна  $8,5^\circ \text{Е}$ . Определить динамическую вязкость в технической системе единиц, если удельный вес нефти составляет  $8\,500 \text{ Н/м}^3$ .

Ответ:  $0,005 \text{ кгс} \cdot \text{с/м}^2$ .

**Задача 24.** Резервуар диаметром 700 мм и высотой 1,2 м имеет массу 10 кг. Определить вес резервуара, заполненного водой при температуре  $4^\circ \text{С}$ . Ответ дать в международной системе единиц.

Ответ: 561 Н.

**Задача 25.** Вязкость цилиндрического масла  $50^\circ \text{Е}$ , удельный вес  $900 \text{ кгс/м}^3$ . Определить динамическую и кинематическую вязкость цилиндрического масла в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ:  $\mu_{\text{ф}} = 3,28 \text{ П}$ ;  $\nu_{\text{ф}} = 3,65 \text{ Ст}$ .

**Задача 26.** При  $20^\circ \text{С}$  кинематическая вязкость глицерина 8,7 Ст, удельный вес  $1260 \text{ кгс/м}^3$ . Вычислить при этой температуре динамическую вязкость глицерина в технической и физической системах единиц.

Ответ:  $\mu_{\text{ф}} = 10,96 \text{ П}$ .

#### Контрольные вопросы:

1. В чем заключается гипотеза сплошности жидкости?
2. Что такое плотность жидкости, от чего она зависит?
3. Какие силы относятся к массовым и поверхностным? Какие виды

напряжений действуют в жидкости?

4. В чем состоит физический смысл объемного модуля упругости?

5. Что такое вязкость жидкости?

6. Какова связь кинематической и динамической вязкости?

7. Поясните природу неньютоновских жидкостей.

8. Какие причины вызывают кавитацию?

9. Что такое "холодное" кипение?

10. Какова природа явления поверхностного натяжения?

## Практическое занятие №2

### Примеры решения задач по уравнению Бернулли.

#### Цель занятия:

- уметь применять уравнение Д. Бернулли для решения практических задач;
- по найденным параметрам построить диаграмму уравнения Д. Бернулли.

#### Ход выполнения:

При применении уравнения Бернулли важно правильно выбрать те два сечения, для которых оно записывается.

В качестве сечений рекомендуется брать:

- свободную поверхность жидкости в резервуаре (баке), где скорость  $v = 0$ ;
- выход в атмосферу, где  $p_{изб} = 0$ ;  $p_{абс} = p_{ат.}$  ;
- сечение, где присоединен тот или иной манометр, пьезометр или вакуумметр;
- неподвижный воздух вдалеке от входа в трубу, в которую происходит всасывание из атмосферы;

Уравнение Бернулли рекомендуется сначала записать в общем виде, а затем переписать с заменой его членов заданными буквенными величинами и исключить члены, равные нулю.

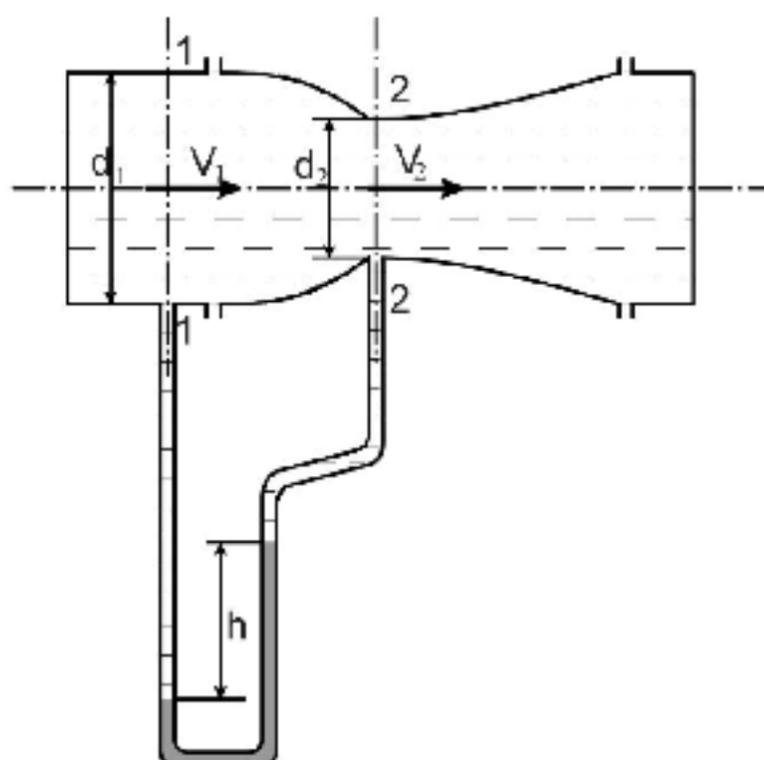
При этом необходимо помнить, что:

- вертикальная ордината  $z$  всегда отсчитывается от произвольно выбранной плоскости вверх;
- давление  $p$ , входящее в правую и левую части уравнения, должно быть задано в одной системе отсчета.

#### Примеры решения задач

#### Пример 1.

Для измерения расхода бензина, плотностью  $\rho_б = 0,73 \text{ т/м}^3$  на трубопроводе, диаметром  $d_1 = 350 \text{ мм}$ , установлен расходомер Вентури. Диаметр суженной части трубопровода  $d_2 = 110 \text{ мм}$ . Определить, пренебрегая сопротивлениями, расход бензина  $Q_б$ , если разность уровней ртути в дифференциальном манометре, присоединенном к расходомеру равна  $h = 300 \text{ мм}$ . Схема задачи – рис.1.



Решение.

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, взяв в качестве плоскости сравнения ось трубы:

$$\frac{V_1}{2g} + \frac{P_1}{\rho_б g} = \frac{V_2}{2g} + \frac{P_2}{\rho_б g}$$

Для определения  $V_1$  и  $V_2$  используем уравнение неразрывности

$$Q_{1-1} = Q_{2-2} = Q = \text{const}$$

$$Q_{1-1} = V_1 F_1 = V_2 F_2$$

$$V_1 = Q/F_1 = V_1(\pi d_1^2/4), \quad V_2 = Q/F_2 = V_2(\pi d_2^2/4)$$

подставляя в исходное уравнение Бернулли скорости, выраженные через расход, получим:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{Q}{F_1} \right)^2 + \frac{P_1}{\rho_6 g} = \frac{1}{2} \left( \frac{Q}{F_2} \right)^2 + \frac{P_2}{\rho_6 g}$$

отсюда выражаем расход бензина

$$Q = \sqrt{\frac{2(P_{1-1} - P_{2-2})}{\rho_6 g} \left( \frac{1}{F_2^2} - \frac{1}{F_1^2} \right)^{-1}}$$

Чтобы найти разность давлений между сечениями 1-1 и 2-2, запишем уравнение гидростатического равновесия, выбрав плоскость равного давления по нижнему уровню ртути:

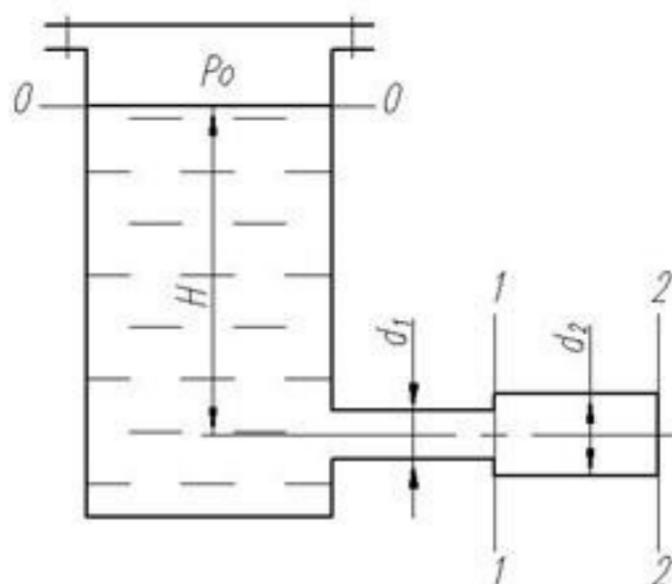
$$P_{1-1} + \rho_6 g h_{1-1} = P_{2-2} + \rho_{рт} g h + \rho_6 g h_{2-2}$$

по рисунку видно, что  $h_{1-1} = h + h_{2-2}$ , отсюда

$$Q = \sqrt{\frac{2\rho_6 g h \left( \frac{\rho_{рт}}{\rho_6} - 1 \right)}{\rho_6 g} \left( \frac{1}{F_2^2} - \frac{1}{F_1^2} \right)^{-1}} = 0,1 \text{ м}^3 / \text{с}$$

### Пример 2.

При известных диаметрах трубопровода и избыточном давлении в резервуаре определить геометрический напор  $H$ , при котором будет обеспечен расход воды  $Q$ . Построить напорную и пьезометрическую линии.



Дано:

$$Q = 11 \text{ л/с}$$

$$P_0 = 20 \text{ кПа}$$

$$d_1 = 32 \text{ мм}$$

$$d_2 = 40 \text{ мм}$$

---


$$H = ?$$

### Решение

Составим уравнение Бернулли для сечения 0-0 и 1-1, выбрав за плоскость сравнения ось трубопровода:

$$z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g},$$

где  $z_0 = H$ ,

$$V_0 = 0,$$

$$z_2 = 0,$$

$P_2 = 0$  - избыточное давление.

$$H + \frac{P_0}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g},$$

$$H = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{P_0}{\rho g} \quad (1).$$

Из уравнения расхода определим  $V_2$ :

$$Q = V_2 \cdot S_2,$$

$$V_2 = \frac{Q}{S_2} = Q \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_2^2},$$

$$V_2 = 11 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4}{3,14 \cdot 0,04^2} = 8,75 \text{ м/с}$$

Подставим значение скорости  $V_2$  в уравнение (1):

$$H = \frac{8,75^2}{2 \cdot 9,81} - \frac{20 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,81} = 1,86 \text{ м}$$

Для построения напорной линии определим скорость  $V_1$  и скоростные напоры:

$$V_1 S_1 = V_2 S_2,$$

$$V_1 = \frac{V_2 S_2}{S_1} = V_2 \frac{d_2^2}{d_1^2},$$

$$V_1 = 8,75 \frac{0,04^2}{0,032^2} = 13,7 \text{ м/с}$$

$$\frac{V_0^2}{2g} = \frac{0^2}{2g} = 0,$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{13,7^2}{2 \cdot 9,81} = 9,57,$$

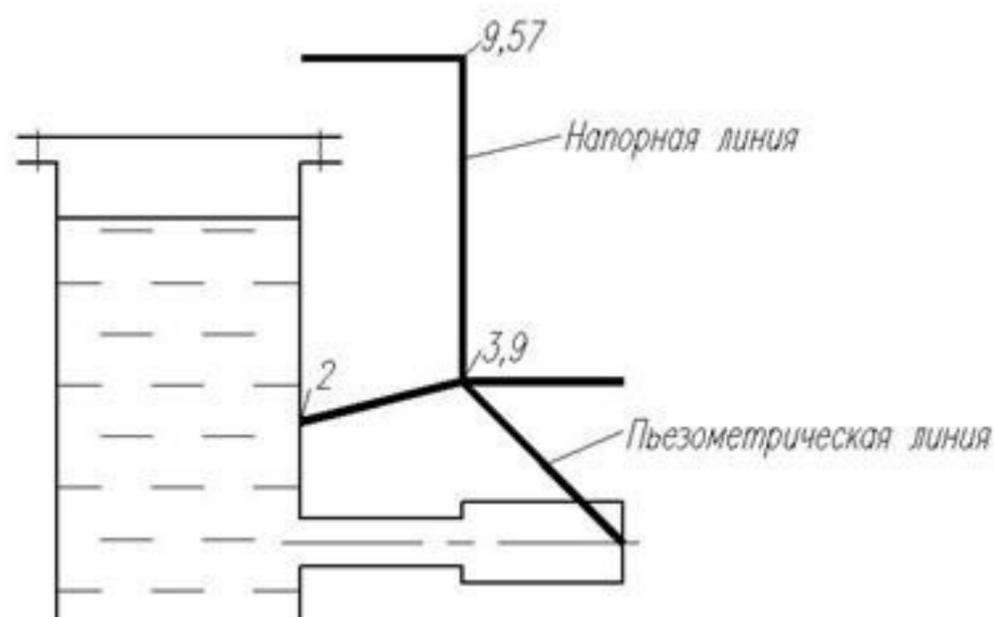
$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{8,75^2}{2 \cdot 9,81} = 3,9$$

Для построения пьезометрической линии определим пьезометрические высоты:

$$\frac{P_0}{\rho g} = \frac{20 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,81} = 2,$$

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_0 + \rho g H}{\rho g} = \frac{20 \cdot 10^3 + 10^3 \cdot 9,81 \cdot 1,86}{10^3 \cdot 9,81} = 3,9,$$

$$\frac{P_2}{\rho g} = \frac{0}{10^3 \cdot 9,81} = 0$$



### Контрольные вопросы

1. Что такое пьезометрический, скоростной и гидродинамический напор? Как они изменяются по длине (по направлению движения жидкости)?
2. Как ориентирована напорная линия при установившемся движении вязкой жидкости?
3. Почему уравнение Бернулли выражает закон сохранения механической энергии в жидкости?
4. Что называется полной удельной энергией потока?
5. Чем отличается уравнение Бернулли для идеальной жидкости от того же уравнения для реальной жидкости?
6. Поясните смысл коэффициента Карриолиса в уравнении Бернулли.
7. За счет чего происходит уменьшение удельной энергии потока?
8. Что такое пьезометрический и гидравлический уклон?
9. В каких измерительных приборах используются закономерности уравнения Бернулли?
10. В чем разница между трубкой Пито и трубкой Пито - Прандтля?

### Практическое занятие №3

Примеры решения задач по определению режима движения жидкости по числу Рейнольдса

Цель занятия:

- уметь применять число Рейнольдса для решения практических задач;

#### Примеры решения задач

##### Пример 1.

При каком режиме будет протекать вода с температурой  $t^\circ = 15^\circ\text{C}$  в открытом прямоугольном лотке, если объёмный расход жидкости  $Q$  равен  $0,56\text{ м}^3/\text{с}$ , глубина воды в лотке  $h = 0,7\text{ м}$ , а ширина лотка  $b = 0,8\text{ м}$ .

Дано  $t^\circ = 15^\circ\text{C}$ ;  
 $Q = 0,56\text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 $h = 0,7\text{ м}$ ;  
 $b = 0,8\text{ м}$ .

#### Решение

При температуре  $t^\circ = 15^\circ\text{C}$  коэффициент кинематической вязкости воды  $\nu = 1,15 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ .

Для определения режима течения необходимо сравнить расчётное число Рейнольдса  $Re$  с критическим значением. Принимаем, что критическое значение числа Рейнольдса равно  $Re_{кр} = 2320$ .

Расчётное число Рейнольдса определяем по формуле:

$$Re_{d_{экс}} = \frac{v \cdot d_{экс}}{\nu},$$

где  $v$  – средняя скорость течения воды в открытом лотке;

$d_{экс}$  – диаметр эквивалентный, м;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Среднюю скорость течения воды в открытом лотке определяем из уравнения неразрывности течения

$$Q = v \cdot \omega,$$

где  $\omega$  – площадь живого (поперечного) сечения потока,  $\text{м}^2$ . Для прямоугольного лотка площадь живого сечения равна

$$\omega = h \cdot b.$$

Тогда

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{h \cdot b} = \frac{0,56}{0,7 \cdot 0,8} = 1,0\text{ м/с}.$$

Диаметр эквивалентный  $d_{экс}$  – это отношение четырёх площадей живого сечения потока  $\omega$  к смоченному периметру  $\chi$ :

$$d_{экс} = \frac{4 \cdot \omega}{\chi}$$

Смоченный периметр  $\chi$  (хи) – часть периметра живого сечения, на которой жидкость соприкасается с твёрдыми стенками. Для открытого прямоугольного лотка смоченный периметр равен  $\chi = h + h + b = 2 \cdot h + b$ .

$$d_{экс} = \frac{4 \cdot \omega}{\chi} = \frac{4 \cdot h \cdot b}{2 \cdot h + b} = \frac{4 \cdot 0,7 \cdot 0,8}{2 \cdot 0,7 + 0,8} = \frac{2,24}{2,2} = 1,02\text{ м}.$$

$$Re_{d_{экс}} = \frac{1,0 \cdot 1,02}{1,15 \cdot 10^{-6}} = 886956,52.$$

$Re > Re_{кр}$ , следовательно режим движения турбулентный.

**Пример 2.**

По напорному трубопроводу переменного сечения подаётся жидкость с объёмным расходом  $Q = 0,6$  л/с. Кинематический коэффициент вязкости жидкости  $3,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Определите диаметр, при котором произойдёт смена режима движения.

Дано  $Q = 0,6$  л/с =  $0,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с;

$\nu = 3,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

**Решение**

Смена режима движения происходит при  $Re_{кр} = Re_{кр}^H$  для цилиндрических напорных труб:

$$Re_{кр} = \frac{v \cdot d}{\nu} = 2000 \dots 2320,$$

где  $v$  – средняя скорость в поперечном сечении потока;

$d$  – диаметр трубопровода, м;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости м<sup>2</sup>/с.

Среднюю скорость течения жидкости выразим из уравнения неразрывности течения  $Q = v \cdot \omega$ :

$$v = \frac{Q}{\omega},$$

где  $\omega$  – площадь живого (поперечного) сечения потока, м<sup>2</sup>.

Для круглого напорного трубопровода площадь живого сечения потока равна:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Тогда

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}.$$

Подставляем это выражение в формулу для определения числа Рейнольдса:

$$Re_{кр} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot Q \cdot d}{\pi \cdot d^2 \cdot \nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot \nu}.$$

Отсюда диаметр, при котором происходит смена режима течения, равен:

$$d = \frac{4 \cdot Q}{Re_{кр} \cdot \pi \cdot \nu}.$$

Принимаем, что критическое значение числа Рейнольдса равно  $Re_{кр} = 2320$ .

Тогда

$$d = \frac{4 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{2320 \cdot 3,14 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6}} = 0,1 \text{ (м)}.$$

**Задачи для самостоятельного решения**

**Задача 1.** Определить число Рейнольдса и режим движения воды в водопроводной трубе диаметром  $d = 300$  мм, если расход  $Q = 0,136$  м<sup>3</sup>/с. Коэффициент кинематической вязкости для воды (при  $t = 10$  °C)  $\nu = 1,306 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

**Задача 2.** По трубопроводу диаметром  $d = 100$  мм транспортируется нефть. Определить критическую скорость, соответствующую переходу ламинарного движения жидкости в турбулентное. Коэффициент кинематической вязкости принять равным  $\nu = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Задача 3.** Как изменяется число Рейнольдса при переходе трубопровода от меньшего диаметра к большему при сохранении постоянства расхода ( $Q = \text{const}$ )?

**Контрольные вопросы**

1. В чем смысл коэффициентов гидродинамического подобия?
2. В зависимости от чего применяется тот или иной коэффициент подобия?
3. Каковы факторы, определяющие режим движения жидкости?
4. Каковы особенности ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости?
5. Что такое осредненная скорость при турбулентном режиме движения?
6. Приведите примеры особенности ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости.

#### Практическое занятие №4

##### Примеры решения задач по движению жидкости в напорных трубопроводах

##### Цель занятия:

- научиться производить расчет напорного трубопровода;

##### Ход выполнения:

При расчетах напорных трубопроводов сталкиваемся с тремя основными задачами в которых надо определить либо пропускную способность (расход), либо потери напора на том или ином участке, равно как и на всей длине, либо диаметр трубопровода на заданных расходе и потерях напора.

##### Задача первая.

Требуется определить напор в начале трубопровода, чтобы обеспечить заданный расход жидкости  $Q$  по трубопроводу с известными параметрами. Уравнение Бернулли, записанное для сечений на поверхности жидкости в резервуаре 1-1 и на выходе из трубы 2-2 (рис. 1, а) имеет вид:

$$\left( Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left( Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) = h_c + h_m$$

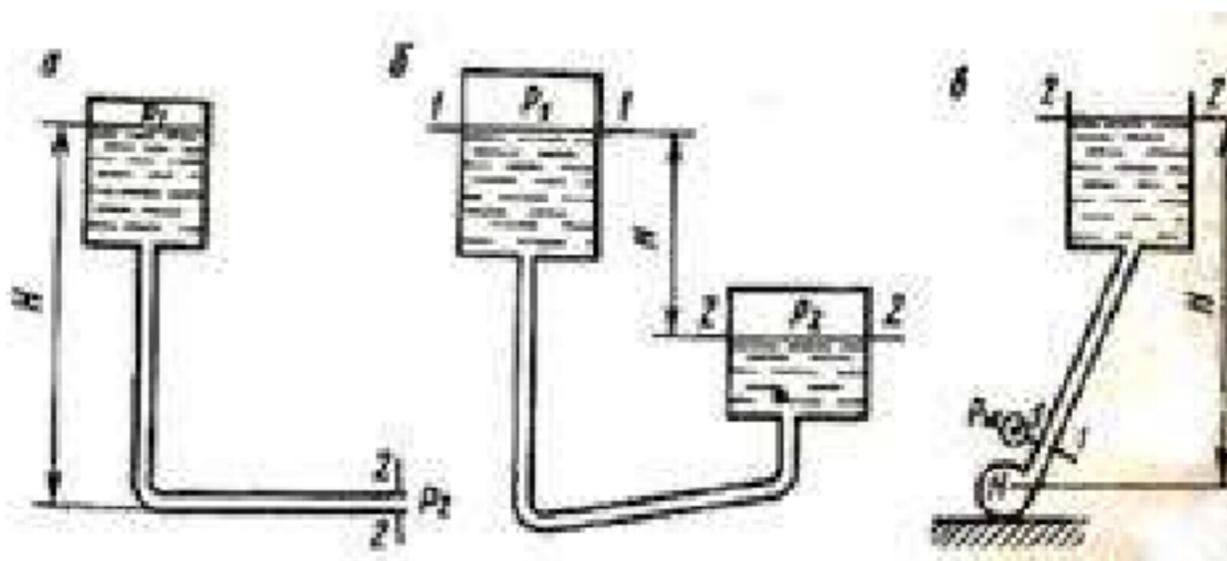


Рисунок 1.

Пренебрегая величиной  $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$  в виду ее малости по сравнению с другими членами уравнения и обозначая разность высот  $Z_1 - Z_2 = H$ , получим уравнение Бернулли в виде:

$$H + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = h_c + h_m = \frac{v^2}{2g} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta + \alpha \right) \quad \text{где } v - \text{ скорость движения жидкости в}$$

трубопроводе;  $P_1$  и  $P_2$  - абсолютные значения

Начальный искомый напор равен сумме  $H + \frac{P_1}{\rho g}$

По заданному расходу, характеристикам жидкости ( $\rho$ ,  $\eta$ ) и трубопровода ( $l$ ,  $d$ ,  $\Delta$ ) находят значения  $v$  и числа  $Re$ , а также значение относительной шероховатости  $\Delta/d$ , определяют режим течения, область течения и выбирают соответствующую формулу для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления.

Аналогично решается задача, когда происходит перетекание жидкости из одного резервуара в другой (рис. 1, б). Для определения необходимого напора составляется уравнение Бернулли для сечений 1—1 и 2—2 на поверхностях жидкости в резервуарах. Получаем

$$H + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = h_{1-2} = h_c + h_m = \frac{v^2}{2g} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right)$$

$$H + \frac{P_1}{\rho g}$$

Необходимый напор в начале трубопровода равен

Во многих случаях источником энергии для перекачки жидкости является насос. Для определения необходимого напора, создаваемого насосом в начале нагнетательной линии (рис. 4, в), составляется уравнение Бернулли для сечений 1-1 в начале этой линии и для сечения 2-2 на свободной поверхности жидкости в резервуаре. Принимая плоскость сравнения, проходящую через центр первого сечения,

получаем 
$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} - H + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right)$$

Из этого выражения может быть найдено давление  $P_1$ , которое должен создавать насос. По найденному давлению и требуемому расходу можно выбрать соответствующий насос для перекачки жидкости. Следует отметить, что в большинстве случаев скоростным напором можно пренебречь ввиду его малости по сравнению с другими членами уравнения Бернулли.

#### *Задача вторая.*

Определение расхода жидкости заданных при остальных параметрах перекачки жидкости по трубопроводу. Рассмотрим схему подачи жидкости (см. рис. 4, а) в трубопровод из напорной емкости. Необходимо определить расход жидкости, что равносильно нахождению скорости движения жидкости в трубопроводе, которая входит в уравнение Бернулли.

Составим уравнение Бернулли для сечений 1 - 1 и 2—2, пренебрегая скоростными напорами:

$$H + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{v^2}{2g} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right)$$

В этой формуле левая часть может быть определена по известным данным задачи. Значение скорости, а значит и расход можно было бы найти, если есть возможность найти члены, входящие в скобки выражения.

В общем случае при режимах течения, отличающихся от квадратичного, коэффициенты гидравлического сопротивления  $\lambda$  и местного сопротивления  $\zeta$  зависят от числа Re, а значит и от  $v$ , а вид этой зависимости заранее неизвестен. Возможны два способа решения такого типа задач: аналитический и графоаналитический.

Аналитически задача может быть решена в тех случаях, когда до начала расчета можно предсказать режим течения, а значит и вид зависимости  $\lambda$  от Re. Так, если предположить, что режим течения будет ламинарным, то коэффициент гидравлического сопротивления определится по формуле  $\lambda = 64/Re$ , а значения  $\zeta$  находят по справочнику. После подготовки значений этих коэффициентов в уравнение находят скорость  $v$ , а затем расход. Аналогично решается задача, если предполагаемый режим является квадратичным. В каждом из этих случаев требуется проверка предполагаемого режима течения, т.е. необходимо, чтобы при ламинарном течении  $Re < 2300$ , а в квадратичной зоне —  $Re > 500$   $d/\Delta$

Если предположение не подтвердилось, то задачу решают методом последовательных приближений, задавая в первом приближении значение расхода  $Q_1$ , находят величину потерь  $h_f$  и сравнивают с потерями напора для заданного трубопровода, равными

$$H_{\text{тр}} = H + \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

Если полученное значение  $h_f$  оказалось больше чем  $H_{TP}$ , то расход уменьшают, а если меньше то следующее значение  $Q_f$ , увеличивают, последовательно приближая получаемое значение  $h_f$  к вычисленному  $H_{TP}$ .

Графоаналитический метод требует построения характеристики трубопровода Q-h (зависимости потерь напора от расхода) с помощью, которой определяют расход  $Q_0$

Для построения характеристики трубопровода сдают ряд произвольных значений расхода жидкости  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  и по ним определяют потери напора  $h_1, h_2, \dots, h_N$  в трубопроводе, как было изложено в первой задаче. Затем по выбранным расходам и соответствующим им потерям напора строим график зависимости Q-h для данного трубопровода (рис. 2).

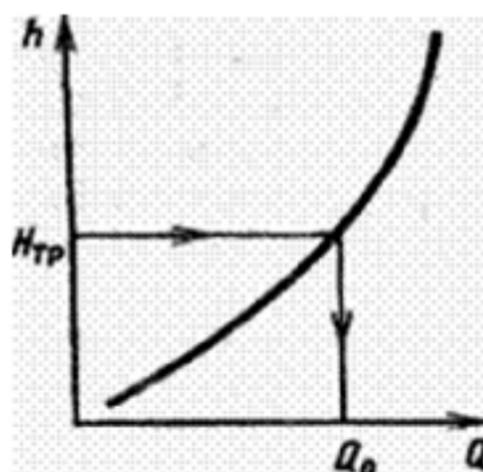


Рисунок 5.

Для найденных потерь  $H_{TP}$  по графику определяем соответствующий им расход жидкости  $Q_0$ . При решении задачи методом последовательных приближений или графоаналитическим требуется большое число вычислений, что наиболее рационально проводить с использованием ЭВМ.

### Задача третья.

Определение минимально необходимого диаметра трубопровода для обеспечения заданного расхода  $Q$  при известном напоре в трубопроводе  $H_{TP}$ . Эта задача может быть решена, как и в предыдущем случае аналитически, методом последовательных приближений или графоаналитически.

В последних двух случаях задаются рядом значений диаметров  $d_f$  и, зная  $Q$ , вычисляют потери напора  $h_f$ . В методе последовательных приближений сравнивают получаемые значения потерь напора с заданными по условию задачи, добиваясь их близкого совпадения.

В графоаналитическом методе строится зависимость потерь напора от диаметра (рис. 6), а затем отложив по оси ординат предварительно вычисленные потери

напора  $H_{TP} = H + \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$  на оси абсцисс находят минимально необходимый диаметр  $d_0$ .

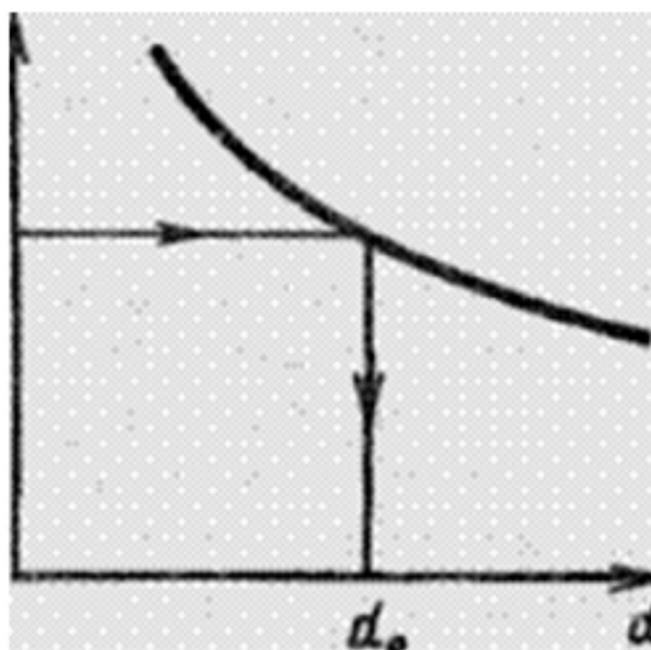


Рисунок 6.

Если диаметр, определенный с этого графика, отсутствует в сортаменте, то берется ближайший большой диаметр.

### Пример решения

#### Задача 1.

Определить расход воды в трубе переменного сечения и давление в сечении X-X (перед входом в трубу меньшего диаметра), если известны давления на поверхности воды в резервуарах  $P_1=P_{изб}=25,48 \cdot 10^4$  Па,  $P_2=P_{вак}=5,88 \cdot 10^4$  Па, коэффициент Дарси  $\lambda=0,025$  и геометрические характеристики :  $H_1=3$  м,  $H_2=2$  м,  $d_1=d_2=3000$  мм,  $d_3=100$  мм,  $d_4=50$  мм,  $l_3=100$  м,  $l_4=50$  м,  $\alpha=10^0$ . Построить пьезометрическую и напорную линии. Схема приведена на рис.1.

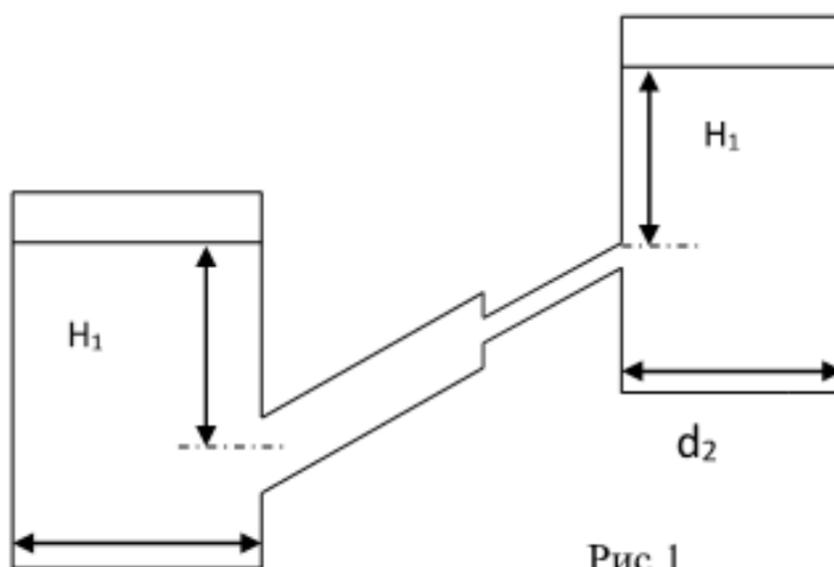


Рис.1.

#### Решение $d_1$

Поставленные в задаче вопросы можно решить с помощью уравнения Бернулли для потока вязкой жидкости:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_w^{1-2}$$

Первый этап – выбор плоскости сравнения. Она должна быть горизонтальной и может проходить на любом уровне. Конечный результат не зависит от положения плоскости сравнения, но желательно ее назначить так, чтобы решение было наиболее удобным и простым. Например, если плоскость будет проходить через центры тяжести используемых в решении сечений, то ординаты энергии положения в уравнении Бернулли обратятся в нуль. Если это невозможно, то желательно, чтобы все ординаты откладывались от плоскости сравнения вверх. В противном случае они будут иметь

отрицательный знак, что заставит учитывать не только модуль, но и знак этих величин. В данном случае нас интересуют в основном сечения труб. Поэтому плоскость сравнения 0-0, проведенная по центру тяжести входного сечения, будет наиболее удобна. При таком ее положении все расстояния от плоскости сравнения до центра тяжести любого поперечного сечения трубы (координаты  $z$ ) можно легко определить. Все они откладываются вверх, то есть положительны. Второй этап – выбор двух живых сечений для уравнения Бернулли. Сечения следует выбирать исходя из следующих соображений: во-первых, в уравнение Бернулли должны войти искомые величины. В данной задаче для определения расхода могут быть использованы скорости, так как эти величины связаны уравнением неразрывности

$$Q=VF; \quad V_1F_1=V_2F_2=\dots=VF=\text{const}$$

где  $V$  – скорость потока,  $F$  – площадь поперечного сечения канала.

Во-вторых, уравнение Бернулли должно содержать минимальное число неизвестных величин. Например, если взять для решения рассматриваемой задачи произвольное поперечное сечение по длине трубы, то в уравнении Бернулли появятся сразу два неизвестных слагаемых:

$$\frac{P}{\rho g} \text{ и } h_w = f\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

Решить уравнение будет невозможно. Выбираем сечения по свободной поверхности воды в резервуарах. Если жидкость вытекает из трубы в атмосферу, то в качестве второго сечения может быть использовано выходное сечение трубы. В этих сечениях все величины известны, а искомая скорость войдет в выражение потерь энергии  $h_w$ .

Определим отдельные члены уравнения Бернулли для выбранных сечений. Геометрические высоты сечений 1-1 и 2-2 равны:

$$Z_1=H_1; \quad Z_2=a+H_2=(l_3+l_4)\sin\alpha+H_2$$

Избыточное давление в центре тяжести этих сечений равно:  $P_1=P_{\text{изб}}$  и  $P_2=-P_{\text{вак}}$ . Скоростными напорами  $V_1^2/2g$  и  $V_2^2/2g$  можно пренебречь в связи с тем, что скорость движения воды в резервуарах значительно меньше скорости в трубе. Диаметры резервуаров в 30-60 раз больше диаметров отдельных участков трубопровода, соответственно скорости меньше в 900-3600 раз. Для определения в уравнении Бернулли потерь энергии  $h_w$  нужно решить, в каком направлении будет двигаться вода. Вычислим полную удельную энергию для выбранных сечений 1-1 и 2-2. Она в данном случае равна пьезометрическим напорам:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = H_1 + \frac{P_{\text{изб}}}{\rho g} = 3 + \frac{25,48 \times 10^4}{10^3 \times 9,8} = 29 \text{ м}$$

$$z_2 + \frac{P_2}{\rho g} = (l_3 + l_4)\sin\alpha + H_2 - \frac{P_{\text{вак}}}{\rho g} = 22,1 \text{ м}$$

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} > z_2 + \frac{P_2}{\rho g}$$

Полная удельная энергия сечения 1-1 больше, чем сечения 2-2. Следовательно, вода будет двигаться из левого резервуара в правый.

Находим потери энергии:

$$h_w^{1-2} = h_m^{\text{вх}} + h_{\text{тр}1} + h_m^{\text{суж}} + h_{\text{тр}2} + h_m^{\text{вых}}$$

где  $h_m^{\text{вх}}$  – потери энергии на вход в трубу;  $h_{\text{тр}1}$ ,  $h_{\text{тр}2}$  – потери энергии по длине трубы;  $h_m^{\text{суж}}$  – потери энергии на сужение;  $h_m^{\text{вых}}$  – потери энергии на выход.

Каждую потерю энергии выражаем через соответствующие коэффициенты сопротивления и скоростной напор по формуле:

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (1), \quad h_m = \zeta \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Местные потери энергии по формуле (2) обычно выражают через скорость потока за местным сопротивлением:

$$h_m^{ex} = \zeta^{ex} \frac{V_3^2}{2g}; \quad h_{mp1} = \lambda \frac{l_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g} = 0,025 \times \frac{100}{0,1} \times \frac{V_3^2}{2g}$$

$$h_m^{суж} = \zeta^{суж} \frac{V_4^2}{2g}; \quad h_{mp2} = \lambda \frac{l_4}{d_4} \frac{V_4^2}{2g} = 0,025 \times \frac{50}{0,05} \times \frac{V_4^2}{2g}$$

$$h_m^{вых} = \zeta^{вых} \frac{V_4^2}{2g}$$

Последняя потеря энергии выражена через скорость перед сопротивлением. Определяем по соответствующим таблицам коэффициенты сопротивления, полагая, что движение жидкости подчиняется закону квадратичного сопротивления. Коэффициент сопротивления. Коэффициент сопротивления на вход при острых кромках входа можно принять  $\zeta^{вх}=0,5$ . Коэффициент сопротивления на сужение  $\zeta^{суж}=0,33$  при

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} = 0,25.$$

Коэффициент сопротивления на выход при истечении из трубы под уровень жидкости равен  $\zeta^{вых}=1$ .

Скоростной напор можно выразить через расход и площадь живого сечения по уравнению неразрывности

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{(4Q)^2}{2g\pi^2 d^4} = \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4} = 0,0827 \frac{Q^2}{d^4}$$

Полученные результаты подставляем в исходное уравнение Бернулли и определяем расход:

$$29 = 22,1 + 0,0827 Q^2 \left( \frac{0,5}{d_3^4} + \frac{25}{d_3^5} + \frac{0,33}{d_4^4} + \frac{25}{d_4^5} + \frac{1}{d_4^4} \right);$$

$$Q^2=0,00001875; \quad Q=0,00433 \text{ м}^3/\text{с}=4,33 \text{ л/с.}$$

Давление  $P_{xx}$  в сечении x-x можно определить тоже с помощью уравнения Бернулли, составив его для сечения x-x и любого поперечного сечения потока с известными характеристиками. Наиболее близким из таких сечений является поверхность воды в левом резервуаре. Для сечения 1-1 и x-x составляем уравнение Бернулли :

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = z_x + \frac{P_x}{\rho g} + \frac{V_x^2}{2g} + h_w^{1-x}$$

где  $Z_x = l_3 \sin \alpha = 17,4$  м – координата центра тяжести сечения x-x относительно плоскости сравнения 0-0. Находим скоростной напор в сечении x-x и потери между выбранными сечениями:

$$\frac{V_3^2}{2g} = \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d_3^4} = 0,083 \frac{Q^2}{d_3^4}$$

$$h_w^{1-x} = h_m^{вх} + h_{тр1}$$

Используя полученные выражения для  $V_3^2/2g$  и  $h_w^{1-x}$ , подставляя числовые значения входящих в уравнение величин, находим:

$$\frac{P_{хиз}}{\rho g} = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} - Z_x - \frac{V_x^2}{2g} - h_m^{вх} - p_{мп1} = 29 - 17,4 - 0,0827 \frac{0,00433}{0,1^4} - 0,0827 - 0,00433^2 \left( \frac{0,5}{0,1^4} + \frac{25}{0,1^4} \right)$$

$$\frac{P_3}{\rho g} = 11,2 \text{ м}; \quad P_3 = 110000 \text{ Н/м}^2 = 0,11 \text{ МПа.}$$

Для построения линии энергии (напорной) и пьезометрической линии подсчитываем числовые значения всех потерь энергии и скоростных напоров:

$$h_m^{вх} = 0,00775 \text{ м}; \quad h_{тр1} = 0,0818 \text{ м}; \quad h_m^{суж} = 0,387 \text{ м}; \quad h_{тр4} = 6,19 \text{ м}; \quad h_m^{вых} = 0,248 \text{ м};$$

$$V_3^2/2g = 0,0155 \text{ м}; \quad V_4^2/2g = 0,248 \text{ м.}$$

Выбрав масштаб, откладываем от плоскости сравнения 0-0 значение гидродинамического напора для первого сечения, равное в данном случае пьезометрическому:

$$H_1 + (P_1/\rho g) = 29 \text{ м.}$$

Строим напорную линию, вычитая из этой величины потери энергии до соответствующего сечения. Для построения пьезометрической линии достаточно вычесть из ординат линии энергии скоростные напоры, соответствующие живым сечениям.

#### Контрольные вопросы

1. Какие виды трубопроводов вы знаете?
2. Какие виды соединений трубопроводов бывают?
3. Сформулируйте суть расчета простого трубопровода?
4. Какие бывают сложные трубопроводы?
5. Что называется гидравлическим ударом?

**Практическое занятие №5**  
**Примеры решения задач по движению жидкости в безнапорных трубопроводах.**

**Цель занятия:**

- научиться производить расчет безнапорного трубопровода;

**Ход выполнения:**

**Гидравлический расчет каналов замкнутого сечения**

К каналам замкнутого сечения относятся различные трубопроводы и туннели, в которых поток воды не заполняет всего сечения. Применяются стандартные профили круглого, шатрового, овоидального и лоткового сечения (рис. 1). Все трубопроводы одной формы геометрически подобны между собой и отличаются друг от друга только по размеру. При расчете любого профиля решаются те же три основные задачи, что и для обычного открытого канала: определение расхода, уклона и размеров сечения.

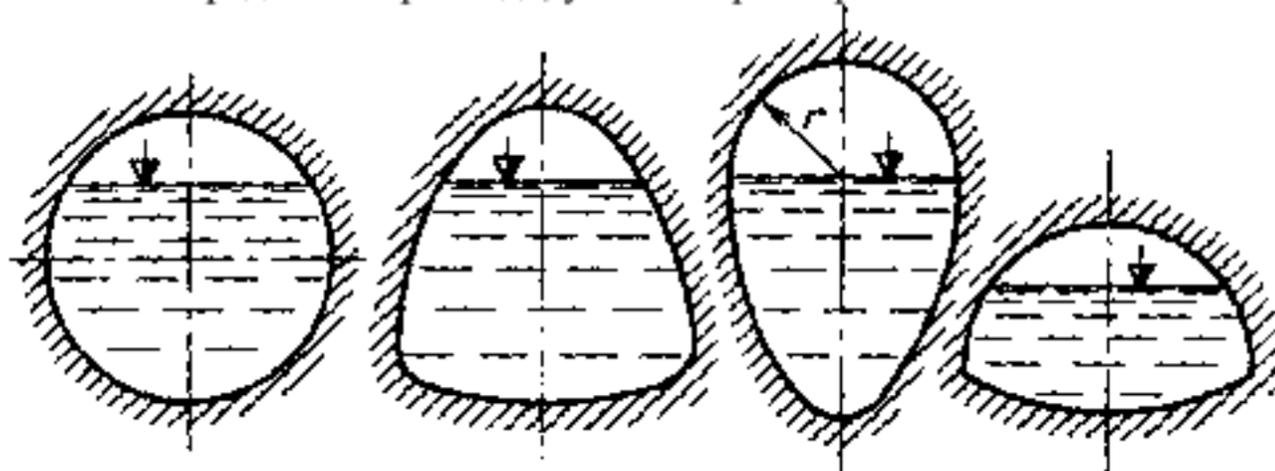


Рис. 1

Гидравлические расчеты туннелей, безнапорных водоводов и канализационных труб производятся по тем же формулам, что и расчет каналов.

*Основной расчетной формулой является уравнение Шези*

$$Q = \varpi c \sqrt{Ri},$$

Безнапорное движение в круглых и овоидальных трубах имеет и некоторые особенности: наибольший расход и наибольшая, скорость наблюдаются при частичном наполнении труб, а не при полном. На рис. 1 даны кривые относительных расходов;  $f1(a) = Q/Q_0$  и скоростей  $f2(a) = v / v_0$  в зависимости от относительной глубины наполнения  $a=h/d$ .

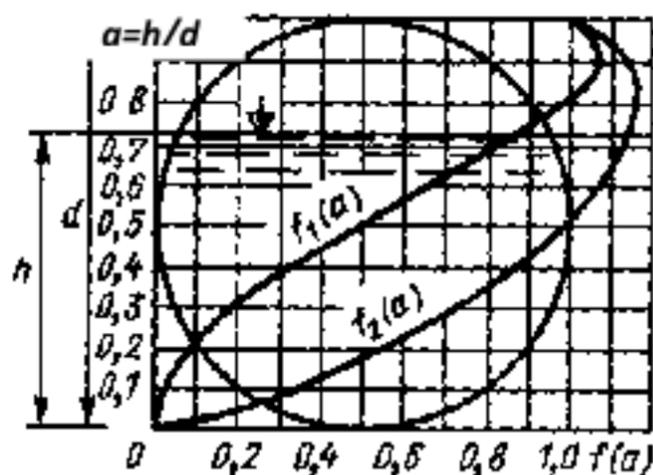


Рис. 1

*Относительный расход - расход воды в трубе, соответствующий данной глубине наполнения и отнесенный к расходу полностью заполненной трубы.*

*Относительная скорость - средняя скорость в трубе при данной глубине наполнения, отнесенная к средней скорости в трубе, работающей полным сечением.*

Так,  $v_{max}$  наблюдается при  $0,8 d$ , а  $Q_{max}$  - при  $0,93 d$ .

Это объясняется тем, что в верхней части трубы площадь живого сечения увеличивается незначительно при повышении уровня, смоченный периметр увеличивается значительно, а гидравлический радиус уменьшается.

Гидравлические характеристики живого сечения потока в частично заполненных трубах ( $\omega$ ,  $\chi$  и  $R$ ) зависят от относительной глубины наполнения трубы. В табл. 4 приведены значения  $\omega$  и  $R$  в зависимости от наполнения.

*Значения площади живого сечения и гидравлического радиуса для круглого сечения трубы при разной глубине наполнения*

Таблица 1

Наполнение $h$	Площадь живого сечения $\omega$	Гидравлический радиус $R$	Наполнение $h$	Площадь живого сечения $\omega$	Гидравлический радиус $R$
0,05d	0,0147d <sup>2</sup>	0,0326d	0,55d	0,4426d <sup>2</sup>	0,2649d
0,10d	0,0400d <sup>2</sup>	0,0635d	0,60d	0,4920d <sup>2</sup>	0,2776d
0,15d	0,0739d <sup>2</sup>	0,0929d	0,65d	0,5404d <sup>2</sup>	0,2881d
0,20d	0,1118d <sup>2</sup>	0,1206d	0,70d	0,5872d <sup>2</sup>	0,2962d
0,25d	0,1435d <sup>2</sup>	0,1466d	0,75d	0,6319d <sup>2</sup>	0,3017d
0,30d	0,1952d <sup>2</sup>	0,1709d	0,80d	0,6736d <sup>2</sup>	0,3042d
0,35d	0,2450d <sup>2</sup>	0,1935d	0,85d	0,7115d <sup>2</sup>	0,3033d
0,40d	0,2934d <sup>2</sup>	0,2142d	0,90d	0,7445d <sup>2</sup>	0,2960d
0,45d	0,3428d <sup>2</sup>	0,2331d	0,95d	0,7707d <sup>2</sup>	0,2865d
0,50d	0,3927d <sup>2</sup>	0,2500d	1,00d	0,7854d <sup>2</sup>	0,2500d

### Пример расчета

Определить расход и скорость в круглой канализационной трубе  $d=600\text{мм}$ , если ее наполнение равно  $0,75d$ , уклон  $i=0,005$ ,  $n=0,014$ .

**Решение**

Определяем  $\omega_0$  и  $R_0$  по таблице 1

$$\omega_0 = 0,632d^2 = 0,632 * 0,6^2 = 0,228\text{м}^2,$$

$$R_0 = 0,302d = 0,302 * 0,6 = 0,181\text{ м}.$$

По таблице 2 при  $n=0,014$  определяем  $C_0 = 54,4\text{ м}^{0,5}/\text{с}$ .

Определяем расход:

$$Q = \omega_0 C \sqrt{Ri} = 0,228 * 54,4 \sqrt{0,181 * 0,005} = 0,228 * 54,4 * 0,03 = 0,37\text{ м}^3/\text{с}.$$

Определяем скорость:

$$v = Q / \omega_0 = 0,37 / 0,228 = 1,62\text{ м/с}$$

Задачу можно решить и несколько иначе, а именно сначала определить расход трубы при полном наполнении, а затем по графику на рис.1 найти искомый расход.

$$\text{Итак, } \omega_0 = 0,785d^2 = 0,785 * 0,6^2 = 0,283\text{ м}^2,$$

$$R_0 = r/2 = 0,3/2 = 0,15\text{ м}$$

По табл. 2 для  $R_0 = 0,15\text{м}$ ,  $n=0,014$  находим  $C_0 = 52,8\text{ м}^{0,5}/\text{с}$

Определяем расход:

$$Q = \omega_0 C \sqrt{Ri} = 0,283 \cdot 52,8 \sqrt{0,15 \cdot 0,005} = 0,409 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее по графику на рис 7 находим  $Q/Q_0=0,9$  при наполнении  $0,75d$ .

Отсюда:  $Q=Q_0 \cdot 0,9=0,409 \cdot 0,9=0,368 \approx 0,37 \text{ м}^3/\text{с}$

Значения коэффициента  $C$  по формуле Н. Н. Павловского,

$$C = 1/n R^y \text{ при } y = 2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,1).$$

Таблица 2

R, м	Значение при C при n							
	0,012	0,014	0,017	0,020	0,0225	0,025	0,030	0,035
0,10	60,3	49,3	38,1	30,6	26,0	22,4	17,3	13,8
0,14	63,3	52,2	40,7	33,0	28,2	24,5	19,1	15,4
0,18	65,6	54,4	42,7	34,8	30,0	26,2	20,6	16,8
0,22	67,5	56,2	44,4	36,4	31,5	27,6	21,9	17,9
0,26	69,1	57,7	45,9	37,8	32,8	28,8	23,0	18,9
0,30	70,5	59,1	47,2	39,0	33,9	29,9	24,0	19,9
0,34	71,8	60,3	48,3	40,0	34,9	30,8	24,9	20,7
0,38	72,9	61,4	49,3	41,0	35,9	31,7	25,6	21,4
0,42	73,9	62,4	50,2	41,9	36,7	32,7	26,4	22,1
0,46	74,8	63,3	51,1	42,7	37,5	33,3	27,1	22,8
0,50	75,7	64,1	51,9	43,5	38,2	34,0	27,8	23,4
0,54	76,6	64,9	52,6	44,2	38,8	34,6	28,4	23,9
0,58	77,3	65,6	53,3	44,9	39,5	35,2	28,9	24,4
0,62	78,1	66,3	54,0	45,5	40,1	35,8	29,4	24,9
0,66	78,8	67,0	54,6	46,0	40,6	36,3	29,6	25,4
0,70	79,4	67,6	55,2	46,6	41,2	36,9	30,4	25,8
0,74	80,0	68,2	55,7	47,1	41,7	37,3	30,8	26,2
0,78	80,5	68,7	56,2	47,6	42,2	37,7	31,3	26,6
0,82	81,0	69,2	56,7	48,1	42,6	38,2	31,7	27,0
0,86	81,4	69,5	57,1	48,4	42,9	38,5	32,0	27,3
0,90	81,8	69,9	57,5	48,8	43,2	38,9	32,3	27,6
0,94	82,4	70,5	58,0	49,3	43,7	39,3	32,7	28,0
0,98	83,0	71,1	58,8	49,8	44,2	39,8	33,1	28,4
1,02	83,5	71,6	59,0	50,2	44,6	40,2	33,5	28,7
1,06	84,0	72,1	59,4	50,5	44,9	40,5	33,8	29,0
1,10	84,4	72,5	59,8	50,9	45,3	40,9	34,1	29,3
1,14	84,8	72,9	60,2	51,3	45,6	41,2	34,4	29,6
1,18	85,2	73,2	60,5	51,6	45,9	41,5	34,6	29,9
1,22	85,6	73,6	60,9	51,9	46,3	41,7	34,9	30,1
1,26	86,0	73,9	61,2	52,2	46,6	42,0	35,2	30,4
1,30	86,3	74,3	61,5	52,5	46,9	42,3	35,5	30,6
1,34	86,6	74,6	61,8	52,8	47,2	42,6	35,7	30,8
1,38	87,0	74,9	62,1	53,1	47,4	42,8	36,0	31,0
1,42	87,3	75,3	62,3	53,3	47,7	43,1	36,2	31,3
1,46	87,7	75,6	62,6	53,6	47,9	43,3	36,5	31,5

1,50	88,0	75,9	62,9	53,9	48,2	43,6	36,7	31,7
1,54	88,3	76,2	63,2	54,1	48,4	43,8	36,9	31,9
<b>R, м</b>	Значение при C при <i>n</i>							
	0,012	0,014	0,017	0,020	0,0225	0,025	0,030	0,035
1,58	88,6	76,4	63,5	54,4	48,6	44,0	37,1	32,1
1,62	88,9	76,7	63,7	54,6	48,9	44,3	37,3	32,3
1,66	89,2	76,9	64,0	54,8	49,1	44,5	37,5	32,5
1,70	89,5	77,2	64,3	55,1	49,3	44,7	37,7	32,7
1,74	89,8	77,4	64,5	55,3	49,5	44,9	37,9	32,8
1,78	90,0	77,7	64,7	55,5	49,7	45,0	38,0	33,0
1,82	90,3	77,9	64,9	55,7	49,9	45,2	38,2	33,1
1,86	90,5	78,2	65,1	55,9	50,1	45,4	38,3	33,3
1,90	90,8	78,4	65,4	56,1	50,3	45,6	38,5	33,4
1,94	91,0	78,6	65,6	56,3	50,5	45,7	38,7	33,5
1,98	91,3	78,9	65,8	56,5	50,7	45,9	38,8	33,7
2,00	91,4	79,0	65,9	56,6	50,8	46,0	38,9	33,8
2,10	91,9	79,5	66,3	57,0	51,2	46,4	39,2	34,1
2,20	92,4	80,0	66,8	57,4	51,6	46,8	39,6	34,4
2,30	93,0	80,5	67,2	57,9	51,9	47,1	39,9	34,8
2,40	93,5	81,0	67,7	58,3	52,3	47,5	40,3	35,1
2,50	94,0	81,5	68,1	58,7	52,7	47,9	40,6	35,4
2,60	94,5	81,9	68,4	59,0	53,0	48,2	40,9	35,6
2,70	94,9	82,3	68,8	59,3	53,3	48,5	41,1	35,9
2,80	95,3	82,6	69,1	59,7	53,6	48,7	41,4	36,1
2,90	95,8	83,0	69,5	60,0	53,9	49,0	41,6	36,4
3,00	96,2	83,4	69,8	60,3	54,2	49,3	41,9	36,6

### Задачи для самостоятельного решения

#### Задача 1.

Определить расход и скорость в круглой канализационной трубе  $d=300\text{мм}$ , если ее наполнение равно  $0,35d$ , уклон  $i=0,005$ ,  $n=0,014$ .

#### Задача 2.

Определить расход и скорость в круглой канализационной трубе  $d=800\text{мм}$ , если ее наполнение равно  $0,85d$ , уклон  $i=0,01$ ,  $n=0,017$ .

#### Контрольные вопросы

1. Какое течение называется равномерным?
2. Назовите основные формулы для расчета каналов?
3. Перечислите основные гидрологические характеристики каналов?
4. Какие скорости называют допустимыми?
5. Назовите суть расчета каналов замкнутого сечения?

## Практическое занятие №6

### Примеры решения задач по основному уравнению установившегося равномерного движения жидкости.

#### Цель занятия:

- научиться производить расчет каналов с открытым руслом;

#### Ход выполнения

*Основной расчетной формулой для равномерного движения воды в каналах является уравнение Шези:*

$$v = C\sqrt{Ri}, v - \text{скорость}$$

Здесь  $i$  - уклон дна канала (применительно к каналам — также уклон свободной поверхности или гидравлический уклон);  $C$  — коэффициент Шези, зависящий от гидравлического радиуса  $R$  и коэффициента шероховатости стенок русла  $n$ .

Формулу расхода в открытом русле можно получить, умножив скорость  $v$  на площадь сечения потока  $\omega$ :

$$Q = v\omega = \omega C\sqrt{Ri}$$

Так как  $\omega C\sqrt{R} = K$  — расходная характеристика, то уравнение расхода записывается и так:

$$Q = K\sqrt{i}$$

Для определения коэффициента Шези широко используются формула Н.Н. Павловского

$$C = 1/n R^y$$

и формула И. И. Агроскина

$$C = 17.72 (0.056/n + \lg R)$$

где  $n$  - коэффициент шероховатости русла;  $R$  - гидравлический радиус;  $y$  - показатель степени, зависящий от  $n$  и  $R$ ,

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,1).$$

Основанная на большом опытном материале формула Павловского дает удовлетворительные результаты при  $n = 0,009-0,040$  и  $R = 0,1-3,0$  м.

При приближенных расчетах и для расчета каналов с небольшими расходами принимают  $y = 1/6$  или  $y = 1/5$  и пользуются формулами Маннинга

$$C = 1/n R^{1/6}$$

или Форхгеймера

$$C = 1/n R^{1/5}$$

Во всех приведенных формулах  $R$  - в метрах,  $C$  - в метрах в степени  $1/2$  в секунду.

Как видно из этих формул, коэффициент Шези зависит от шероховатости русла. В табл. 1 приведены значения  $n$  как для искусственных, так и для естественных русел, а в табл. 2 - значения коэффициента  $C$  в зависимости от  $R$  и  $n$ .

#### Коэффициент шероховатости $n$ по Н. Н. Павловскому

Таблица 1.

#### Характеристика поверхности

Поверхности, покрытые эмалью или глазурью. Весьма тщательно остроганные, хорошо пригнанные доски	0,009
Строганные доски. Штукатурка из чистого цемента	0,01
Цементная штукатурка (1/3 песка) Чистые (новые) гончарные, чугунные и стальные трубы, хорошо уложенные и соединенные	0,01

Нестроганные доски, хорошо пригнанные Водопроводные трубы в нормальных условиях, без заметной инкрустации. Весьма чистые водосточные трубы. **0,012**

Тесовая кладка. Весьма хорошая кирпичная кладка Водосточные трубы в нормальных условиях. Несколько загрязненные водопроводные трубы Нестроганные доски, не вполне тщательно пригнанные **0,013**

«Загрязненные» трубы (водопроводные и водосточные) Кирпичная кладка. Бетонировка каналов в средних условиях **0,014**

Грубая кирпичная кладка Каменная кладка (не тесовая) с чистой отделкой поверхностей при ровном постелистом камне Чрезвычайно загрязненные водостоки Брезент по деревянным рейкам **0,015**

Обыкновенная бутовая кладка в удовлетворительном состоянии. Старая (расстроенная) кирпичная кладка. Сравнительно грубая бетонировка Гладкая, весьма хорошо разработанная скала **0,017**

Каналы, покрытые толстым устойчивым илистым слоем Каналы в плотном лесе и в плотном мелком гравии, затянутые сплошной илистой пленкой **0,018**

Очень грубая бутовая кладка. Сухая кладка из крупных камней. Булыжная мостовая. Каналы, чисто высеченные в скале. Каналы в лесе, плотном гравии, плотной земле, затянутые илистой пленкой (в нормальном состоянии) **0,02**

Мостовая из крупного рваного камня с резко выступающими углами. Каналы в скале при посредственной обработке поверхности. Каналы в плотной глине Каналы в лесе, гравии, земле, затянутые несплошной (местами прерываемой) илистой пленкой. Большие земляные каналы, находящиеся в условиях содержания и ремонта выше средних **0,0225**

Большие земляные каналы в средних условиях содержания и ремонта и малые - в хороших. Реки и ручьи в благоприятных условиях (со свободным течением, без засорения и значительных водорослей) **0,025**

Земляные каналы, большие - в условиях ниже среднего, малые - в средних условиях **0,0275**

Каналы и реки в сравнительно плохих условиях (местами с водорослями и булыжником или заметно заросшие травой с местными обвалами откосов и т.д.) **0,03**

Каналы и реки, находящиеся в весьма плохих условиях (с неправильным профилем, значительно засоренные камнями и водорослями) **0,035**

Каналы и реки в исключительно плохих условиях (обломки скалы и крупные камни по руслу, густые корни, значительные промоины и обвалы, заросли камыша) **0,04**

*Значения коэффициента C по формуле Н. Н. Павловского,*

$$C = 1/n R^y \text{ при } y = 2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,1).$$

Таблица 2

R, м	Значение при C при n							
	0,012	0,014	0,017	0,020	0,0225	0,025	0,030	0,035
0,10	60,3	49,3	38,1	30,6	26,0	22,4	17,3	13,8
0,14	63,3	52,2	40,7	33,0	28,2	24,5	19,1	15,4
0,18	65,6	54,4	42,7	34,8	30,0	26,2	20,6	16,8
0,22	67,5	56,2	44,4	36,4	31,5	27,6	21,9	17,9
0,26	69,1	57,7	45,9	37,8	32,8	28,8	23,0	18,9

0,30	70,5	59,1	47,2	39,0	33,9	29,9	24,0	19,9
0,34	71,8	60,3	48,3	40,0	34,9	30,8	24,9	20,7
0,38	72,9	61,4	49,3	41,0	35,9	31,7	25,6	21,4
0,42	73,9	62,4	50,2	41,9	36,7	32,7	26,4	22,1
0,46	74,8	63,3	51,1	42,7	37,5	33,3	27,1	22,8
0,50	75,7	64,1	51,9	43,5	38,2	34,0	27,8	23,4
0,54	76,6	64,9	52,6	44,2	38,8	34,6	28,4	23,9
0,58	77,3	65,6	53,3	44,9	39,5	35,2	28,9	24,4
0,62	78,1	66,3	54,0	45,5	40,1	35,8	29,4	24,9
0,66	78,8	67,0	54,6	46,0	40,6	36,3	29,6	25,4
0,70	79,4	67,6	55,2	46,6	41,2	36,9	30,4	25,8
0,74	80,0	68,2	55,7	47,1	41,7	37,3	30,8	26,2
0,78	80,5	68,7	56,2	47,6	42,2	37,7	31,3	26,6
0,82	81,0	69,2	56,7	48,1	42,6	38,2	31,7	27,0
0,86	81,4	69,5	57,1	48,4	42,9	38,5	32,0	27,3
0,90	81,8	69,9	57,5	48,8	43,2	38,9	32,3	27,6
0,94	82,4	70,5	58,0	49,3	43,7	39,3	32,7	28,0
0,98	83,0	71,1	58,8	49,8	44,2	39,8	33,1	28,4
1,02	83,5	71,6	59,0	50,2	44,6	40,2	33,5	28,7
1,06	84,0	72,1	59,4	50,5	44,9	40,5	33,8	29,0
1,10	84,4	72,5	59,8	50,9	45,3	40,9	34,1	29,3
1,14	84,8	72,9	60,2	51,3	45,6	41,2	34,4	29,6
1,18	85,2	73,2	60,5	51,6	45,9	41,5	34,6	29,9
1,22	85,6	73,6	60,9	51,9	46,3	41,7	34,9	30,1
1,26	86,0	73,9	61,2	52,2	46,6	42,0	35,2	30,4
1,30	86,3	74,3	61,5	52,5	46,9	42,3	35,5	30,6
1,34	86,6	74,6	61,8	52,8	47,2	42,6	35,7	30,8
1,38	87,0	74,9	62,1	53,1	47,4	42,8	36,0	31,0
1,42	87,3	75,3	62,3	53,3	47,7	43,1	36,2	31,3
1,46	87,7	75,6	62,6	53,6	47,9	43,3	36,5	31,5
1,50	88,0	75,9	62,9	53,9	48,2	43,6	36,7	31,7
1,54	88,3	76,2	63,2	54,1	48,4	43,8	36,9	31,9
<b>R, м</b>	Значение при C при n							
	0,012	0,014	0,017	0,020	0,0225	0,025	0,030	0,035
1,58	88,6	76,4	63,5	54,4	48,6	44,0	37,1	32,1
1,62	88,9	76,7	63,7	54,6	48,9	44,3	37,3	32,3
1,66	89,2	76,9	64,0	54,8	49,1	44,5	37,5	32,5
1,70	89,5	77,2	64,3	55,1	49,3	44,7	37,7	32,7
1,74	89,8	77,4	64,5	55,3	49,5	44,9	37,9	32,8
1,78	90,0	77,7	64,7	55,5	49,7	45,0	38,0	33,0
1,82	90,3	77,9	64,9	55,7	49,9	45,2	38,2	33,1
1,86	90,5	78,2	65,1	55,9	50,1	45,4	38,3	33,3
1,90	90,8	78,4	65,4	56,1	50,3	45,6	38,5	33,4
1,94	91,0	78,6	65,6	56,3	50,5	45,7	38,7	33,5
1,98	91,3	78,9	65,8	56,5	50,7	45,9	38,8	33,7
2,00	91,4	79,0	65,9	56,6	50,8	46,0	38,9	33,8

2,10	91,9	79,5	66,3	57,0	51,2	46,4	39,2	34,1
2,20	92,4	80,0	66,8	57,4	51,6	46,8	39,6	34,4
2,30	93,0	80,5	67,2	57,9	51,9	47,1	39,9	34,8
2,40	93,5	81,0	67,7	58,3	52,3	47,5	40,3	35,1
2,50	94,0	81,5	68,1	58,7	52,7	47,9	40,6	35,4
2,60	94,5	81,9	68,4	59,0	53,0	48,2	40,9	35,6
2,70	94,9	82,3	68,8	59,3	53,3	48,5	41,1	35,9
2,80	95,3	82,6	69,1	59,7	53,6	48,7	41,4	36,1
2,90	95,8	83,0	69,5	60,0	53,9	49,0	41,6	36,4
3,00	96,2	83,4	69,8	60,3	54,2	49,3	41,9	36,6

### Гидравлические характеристики открытого русла

Поперечные сечения чаще всего представляют собой трапеции, прямоугольники и овалы, как правило, частично заполненные водой. Наиболее распространенным профилем открытого канала является трапецеидальный профиль (рис. 5), поскольку боковые откосы его значительно более устойчивы, чем откосы при других сечениях, кроме того, упрощается производство работ при строительстве таких каналов.

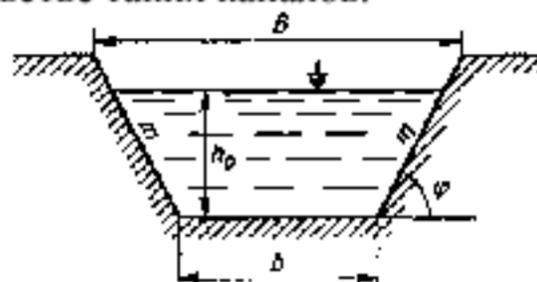


Рис. 5.

$b$  - ширина канала по дну;  $B$  - ширина канала по верху;  $h_0$  - глубина наполнения канала

Для симметричного трапецеидального сечения:

площадь живого сечения

$$\omega_0 = (b + mh_0)h_0;$$

смоченный периметр

$$\chi_0 = b + 2h_0 \sqrt{1 + m^2};$$

гидравлический радиус

$$R_0 = \omega_0 / \chi_0 = (b + mh_0)h_0 / b + 2h_0 \sqrt{1 + m^2}$$

Для прямоугольного русла:

площадь живого сечения

$$\omega_0 = bh_0$$

смоченный периметр

$$\chi_0 = b + 2h_0$$

гидравлический радиус

$$R_0 = bh_0 / b + 2h_0$$

### Допустимые скорости в каналах

Большие скорости течения воды в канале могут разрушать дно; и стенки канала, поэтому средняя скорость воды в канале должна быть меньше размывающей скорости  $v < v_{max}$ . В таблице 3 даны, ориентировочные предельные допустимые скорости в зависимости от грунтов, в которых проходит канал, и видов облицовок.

Для предупреждения заиления канала необходимо, чтобы средняя скорость движения воды в канале была больше некоторой минимальной скорости, при которой частицы взвешиваются потоком:  $v > v_{min}$ .

При  $R \neq 1m$  следует умножать значение максимальной скорости на  $\sqrt[3]{R_0}$ .

Минимальную, или критическую, скорость можно приближенно определить по формуле

$$v_{min} = l\sqrt{R_0}$$

где  $l$ —величина, которая зависит от гидравлической крупности частиц взвешенных наносов (скорости падения частиц в стоячей воде), а также от коэффициента шероховатости. Для  $n = 0,0225$  и диаметра частиц  $d = 0,25$  мм можно принимать  $l = 0,5$ . Чтобы канал не зарастал,  $v \geq 0,6$  м/с. При расчете поперечного сечения канала учитывают пропускаемый расход воды, условия трассы, потери на фильтрацию, особенности производства работ и эксплуатации.

Значения предельных допустимых неразмывающих скоростей  $v_{max}$  для каналов при  $R = 1$  м

Таблица 3.

Характеристика грунта или облицовки канала	Максимальная скорость* $v_{max}$ , м/с
Илистый грунт, разложившийся торф	0,25-0,5
Супесь слабая, пылеватый песок, легкие суглинки, глины мягкие, средний лесс	0,7—0,8
Малоразложившийся осоково-гипновый торф	0,7-1,0
Суглинки средние и плотные, плотный лесс	1,0-1,2
Малоразложившийся сфагновый торф	1,2-1,5
Глины	1,2-1,8
Одерновка	0,8-1,0
Бульжная мостовая	1,5-3,5
Бетонная и железобетонная облицовка	5,0-10,0
Деревянный лоток	6,5

### ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЗАДАЧ

При проектировании трапецеидальных каналов рассматривают три основных типа задач:

**задача 1** - определение расходов  $Q$  (скорости) при заданном уклоне  $i$  и принятом поперечном сечении  $\omega$  канала;

**задача 2** - определение уклона дна  $i$  при заданном расходе  $Q$  и принятом поперечном сечении  $\omega$  канала;

**задача 3** - определение элементов живого сечения  $b$  и  $h$  при заданном расходе  $Q$  и уклоне  $i$  канала.

Коэффициент откоса  $m$  обычно выбирается из условия устойчивости откосов или их облицовки; коэффициент шероховатости выбирается в зависимости от характеристики поверхности русла.

**Задача 1.** Известны  $i$ ,  $m$ ,  $n$  и размеры поперечного сечения канала  $b$ ,  $h$ . Определить  $Q$ .

Задача решается непосредственным вычислением расхода по формуле:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}$$

Предварительно вычисляются величины:

$$\omega = (b + mh)h; \quad \chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$$

$$R_0 = \omega / \chi; \quad C = 1 / n R^y \text{ или } C = 1 / n R^{1/6}$$

**Пример.** Канал трапецеидального сечения, проложенный в суглинистом грунте, имеет уклон  $i = 0,0004$ , ширину по дну  $b = 2$  м. Глубина воды  $h = 1,2$  м;  $n = 0,0225$ ;  $m = 1$ .

Определить среднюю скорость воды в канале и расход, проверить возможность размыва или заиления канала.

**Решение.**

Определяем последовательно:

$$\omega = (b+mh)h = (2+1 \cdot 1,2) \cdot 1,2 = 3,84 \text{ м}^2;$$

$$\chi = b+2h\sqrt{1+m^2} = 2+2 \cdot 1,2\sqrt{1+1^2} = 5,39 \text{ м}$$

$$R = \omega/\chi = 3,84/5,39 = 0,71 \text{ м.}$$

По табл. 2 определяем  $C=41,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ .

Находим расход:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} = 3,84 \cdot 41,3 \sqrt{0,71 \cdot 0,0004} = 2,67 \text{ м}^3/\text{с}$$

Определяем среднюю скорость в канале:

$$v = Q/\omega = 2,67/3,84 = 0,695 \text{ м/с}$$

Допустимая скорость в канале для данного грунта по данным табл. 3

$$v_{\max} = 1 \text{ м/с}$$

Поскольку скорость в канале  $v = 0,695 \text{ м/с}$ , что значительно меньше допустимой, размыва не произойдет.

Определим  $v$  из условия незаиления канала:

$$v = 0,5 \sqrt{0,71} = 0,42 \text{ м/с}$$

*Поскольку  $v_{\min} < v$  заиления канала не будет.*

**Задача 2.** Требуется определить уклон  $i$ , если даны все остальные параметры:  $Q, b, m, n$ .

Необходимый уклон находим непосредственно из формулы расхода:

$$i = Q^2 / \omega^2 C^2 R$$

Для чего предварительно по соответствующим формулам находим  $\omega, C, R$ .

**Пример.** Какой уклон необходимо придать дну канала, если  $b = 8 \text{ м}$ ,  $h = 1,6 \text{ м}$ ,  $Q = 15 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $m = 1,5$ ,  $n = 0,014$

**Решение**

Определяем:

$$\omega = (b+mh)h = (8 + 1,5 \cdot 1,6) \cdot 1,6 = 16,64 \text{ м}^2;$$

$$\chi = b+2h\sqrt{1+m^2} = 8 + 2 \cdot 1,6 \sqrt{1+1,5^2} = 8 + 5,77 = 13,77 \text{ м};$$

$$R = \omega/\chi = 16,64/13,77 = 1,21 \text{ м}$$

По таблице 2 при  $R = 1,21 \text{ м}$  и  $n = 0,014$  определяем  $C = 73,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ .

Находим уклон дна:

$$i = Q^2 / \omega^2 C^2 R = 15^2 / 16,64^2 \cdot 73,5^2 \cdot 1,21 = 0,000124$$

**Задача 3.** Известны  $Q, i, m, n$ . Определить размеры живого сечения  $b$  и  $h$ .

Так как расчетное уравнение одно:  $Q = \omega C \sqrt{Ri}$ , а требуется определить два неизвестных, то задача неопределенная. Чтобы ее решать, необходимо задаться  $b$  или  $\beta = b/h$

#### Возможны три варианта решения

1. Задаемся значением  $b$  и определяем, соответствующую ему и условиям задачи  $h$ . Задачу решаем подбором: назначаем последовательно ряд глубин и вычисляем расходы до пор, пока не получим требуемого расхода; соответствующая этому расходу глубина и будет искомой.

Эту задачу можно решить и графоаналитическим способом. Задаваясь, как и выше, рядом глубин, получаем соответствующие им расходы, затем строим кривую зависимости  $Q = f(h)$ ; отложив по оси  $Q$  требуемый расход, определяем по графику глубину наполнения  $h$ .

**Пример.** Определить глубину наполнения трапецидального канала, работающего в условиях равномерного режима, если  $m = 1,5$ ,  $n = 0,014$ ,  $h = 20 \text{ м}$ ,  $Q = 280 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $i = 0,0005$ .

### Решение

Задачу решаем графоаналитическим способом по известным формулам последовательно определяем  $\omega$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $\chi$ ,  $Q$  и результаты сводим в таблицу.

$h, м$	$\omega, м^2$	$\chi, м$	$R, м$	$C, м^{0.5/c}$	$Q, м^3/c$
3	73,5	30,8	2,4	81,0	206
3.5	88,4	32,6	2,7	82,3	267
4	104,0	34,4	3,02	83,5	337

По данным таблицы строим график  $Q=f(h)$ .

Откладываем по оси абсцисс заданный расход  $Q = 280 м^3/c$  и, восстановив перпендикуляр до пересечения с кривой, находим точку  $A$ . Этой точке на оси ординат соответствует искомая глубина  $h_0 = 3.6 м$ .

2. Можно задаться глубиной  $h$  и находить ширину канала по дну  $b$ . Задача решается так же, как и предыдущая: или подбором, или графоаналитическим методом. Назначаем ряд значений  $b$  и повторяем расчет канала до тех пор, пока расход не станет равен требуемому. Ширина  $b$ , при которой расход равен требуемому, и есть искомая.

Если задачу решаем графоаналитическим методом, то по данным расчета строим кривую  $Q = f(b)$ , т.е. задаемся рядом значений  $b$ , находим соответствующие им расходы и затем строим график. Откладывая затем по оси абсцисс требуемый расход, по оси ординат определяем  $b$ .

3. Если даны  $\beta = b/h$ ,  $Q$ ,  $m$ ,  $n$  и требуется найти  $b$  и  $h$ , то задача решается так же, как и предыдущая.

Задаемся рядом глубин  $h$  и находим соответствующие им  $b$ ,  $\omega$ ,  $C$  и  $Q$ .

### Задачи для самостоятельного решения

#### Задача 1.

Канал трапецидального сечения, проложенный в суглинистом грунте, имеет уклон  $i = 0,0004$ , ширину по дну  $b=3 м$ . Глубина воды  $h = 1,6 м$ ;  $n=0,0225$ ;  $m=1$ .

Определить среднюю скорость воды в канале и расход, проверить возможность размыва или заиления канала.

#### Задача 2.

Известны  $i$ ,  $m$ ,  $n$  и размеры поперечного сечения канала  $b$ ,  $h$ . Определить  $Q$  при  $i = 0,01$ ,  $n = 0,017$ ,  $m = 1$ ,  $b=2 м$ ,  $h = 1,4 м$ .

#### Задача 3.

Определить глубину наполнения трапецидального канала, работающего в условиях равномерного режима, если  $m=1$ ,  $n=0.017$ ,  $h=10м$ ,  $Q=180 м^3/c$   $i = 0.0005$ .

### Контрольные вопросы

1. Какое течение называется равномерным?
2. Назовите основные формулы для расчета каналов?
3. Перечислите основные гидрологические характеристики каналов?
4. Какие скорости называют допустимыми?

**Практическое занятие №7**  
**Определение гидрологических параметров, построение**  
**поперечного профиля водоема**

**ЗАДАНИЕ 1: Построить поперечного профиль реки.**

**ЗАДАНИЕ 2: Определить гидрологические параметры реки.**

**Ход выполнения**

*Морфостворы* намечают предварительно по картографическому материалу (или по генеральному плану перехода) нормально к направлению течения в русле и на поймах при высокой воде.

На участках, где направления руслового и пойменных потоков не совпадают, морфоствор может быть ломаным.

Как правило, морфоствор располагают в наиболее узких местах пойм с наименьшим числом стариц, проток; для блуждающих рек – в местах с наименьшей шириной зоны блуждания.

Морфоствор, предназначенный для распределения расчетного расхода между русловой и пойменной частями потока, располагают непосредственно выше трассы мостового перехода.

Морфостворы разбивают теодолитом. В местах пересечения с руслом реки, протоками, старицами или озерами определяют отметки урезов воды и измеряют глубины. Границами морфоствора являются отметки земли, превышающие УВВ на 1-2 м для уровней высоких половодий и на 2-3 м – для ливневых паводков.

Морфостворы привязывают к продольному профилю рек.

При съемке морфостворов снимают ситуацию на расстоянии 50 глубин потока в паводок вверх и 20 вниз от оси, но не менее чем по 100 м в каждую сторону, подробно описывая морфологические особенности створа.

*Морфологическими характеристиками створа являются:*

– наличие на пойме протоков, староречий и озер, спрямляющих течений, прорывов перешейков речных излучин, постоянно или временно действующих водотоков, а также прорыв старых прирусловых валов;

– характер растительности по морфоствору, выше и ниже его (трава, кустарник, лес, их густота и высота);

– наличие на пойме различных построек, насыпей и других сооружений;

– характеристика грунтов в русле реки и на незадернованных участках пойм;

– частота затопления пойм.

На основании указанных признаков устанавливают значения коэффициентов шероховатости  $n$  для участков, имеющих различное сопротивление течению.

В процессе проведения морфометрических работ на больших реках рекомендуется измерять скорости течения вертушкой или поплавками с измерением уклонов по урезным кольям. Это даст возможность уточнить коэффициенты шероховатости, назначенные по таблице. Построение продольного профиля реки производится на миллиметровой бумаге в масштабе, который принимается по рекомендациям табл. 1.

*Таблица 1. Масштабы для построения морфостворов*

Характеристика водотока	Масштаб	
	горизонтальный	вертикальный
Малые реки	1:1000 – 1:2000	1:100 – 1:200
Средние реки и большие реки	1:5000 – 1:10000	1:200

Пример оформления чертежа морфоствора приведен на рис.1.



## Практическое занятие №8

### Гидрометрические расчеты при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений

**ЗАДАНИЕ 1: Определение площади водосборного бассейна и ее характеристик.**

**ЗАДАНИЕ 2: Определение максимального стока воды.**

#### Ход выполнения

##### 1. Определение площади водосборного бассейна и ее характеристик

Для того чтобы найти водосборную площадь на карте проводим границы исходя из точек водораздела. На полученный план водосборного бассейна накладывается палетка, разлиновывается на квадратики одинаковой площадью согласно масштабу карты. Отмечаем и пересчитываем все целые квадратные сантиметры ( $n_1$ ), которые поместились на плане. Затем пересчитываем оставшиеся неполные квадратики ( $n_2$ ). Так как рассматриваемый бассейн является двускатным, производим его разделение по главному логу и расчеты берутся как для двух самостоятельных бассейнов. Площадь водосборного бассейна определяется по формуле (4.1):

$$A = \left( n_1 + \frac{n_2}{2} \right) \cdot M \quad (4.1)$$

где  $M$  – площадь (в масштабе карты)  $1 \text{ см}^2$ , равная  $0,0625 \text{ км}^2$ ;

$n_1, n_2$  – количество квадратов каждого размера, определяемого по карте.

$$A_{11} = \left( 2 + \frac{32}{2} \right) \cdot 0.0625 = 1,13 \text{ км}^2$$

$$A_{12} = \left( 1 + \frac{26}{2} \right) \cdot 0.0625 = 0,88 \text{ км}^2$$

$$A_1 = 1.13 + 0.88 = 2.01 \text{ км}^2$$

$$A_{21} = \left( 0 + \frac{10}{2} \right) \cdot 0.0625 = 0,31 \text{ км}^2$$

$$A_{22} = \left( 0 + \frac{4}{2} \right) \cdot 0.0625 = 0,13 \text{ км}^2$$

$$A_2 = 0.31 + 0.13 = 0,44 \text{ км}^2$$

##### 2. Определение уклона главного лога

В общем случае уклон главного лога определяется между отметками лога у сооружения и отметкой верхней части лога, лежащей на водораздельной линии.

Определяем уклон главного лога (формула 4.2):

$$i_{\text{л}} = \frac{\nabla A - \nabla H}{z} \quad (4.2)$$

где  $\nabla A$  – отметка у водораздела, м;

$\nabla H$  – отметка лога у сооружения, м;

$Z$  – длина главного лога, принимаемая как длина от водораздела до сооружения вдоль трассы.

$$i_{\text{л}11} = \frac{(190.00 - 122.00)}{2100} \cdot 1000 = 32\text{‰};$$

$$i_{\text{л}12} = \frac{(216.00 - 122.00)}{1900} \cdot 1000 = 49\text{‰};$$

$$i_{\text{л}21} = \frac{(216.00 - 208.00)}{800} \cdot 1000 = 10\text{‰}$$

$$i_{\text{л}22} = \frac{(213.80 - 208.00)}{500} \cdot 1000 = 12\text{‰}$$

##### 3. Определение уклона лога у сооружения

Уклон лога у сооружения определяется как уклон между точками, одна из которых находится на 100 – 200 м выше сооружения, а другая – на 100 – 200 м ниже по главному логу.

Желательно назначать точки на горизонталях с тем, чтобы не заниматься расчетом их отметок. Но при этом стремиться к тому, чтобы определенный уклон лога был как можно ближе к реальному уклону местности.

Уклон лога у сооружения определяется по формуле (4.3):

$$i_o = \frac{\nabla B - \nabla C}{L} \quad (4.3)$$

где  $\nabla B$  – отметка точки расположенной вверх на 100 м по главному логу;

$\nabla C$  – отметка точки расположенной вниз на 200 м по главному логу;

$L$  – расстояние от верхней и нижней точек.

$$i_{o2} = \frac{210.50 - 202.00}{300} \cdot 1000 = 28,33\%$$

#### 4. Определение коэффициента откосов берегов главного русла

Для того чтобы определить коэффициент откосов берегов необходимо построить живое сечение водотока. По формуле (4.4) определяем значение коэффициента.

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{l_1}{h_1} + \frac{l_2}{h_2} \right) \quad (4.4)$$

где  $l_1, l_2$  – расстояние от сооружения до точек водораздела, м;

$h_1, h_2$  – высота между отметкой сооружения до высоты водораздела, м;

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{2100}{68} + \frac{1900}{94} \right) = 25.55;$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{800}{8} + \frac{500}{5.8} \right) = 372.42;$$

#### 5. Определение заложения склонов лога у сооружения. (трубы)

Форма поперечного сечения лога упрощенно представлена в форме треугольника.

Заложение правого склона определяется по формуле (4.5):

$$m_{\text{пр}} = \frac{L_{\text{пр}}}{H_{\text{пр}} - H_c} \cdot \sin \alpha \quad (4.5)$$

где  $L_{\text{пр}}$  – расстояние от правого водораздела до лога сооружения, м;

$H_{\text{пр}}$  – отметка правого водораздела по оси дороги, м;

$H_c$  – отметка лога у сооружения, м;

$\alpha$  – угол у сооружения, °.

$$m_{\text{пр1}} = \frac{1900}{216.00 - 122.00} \cdot \sin 90 = 20,21 \quad \text{м,}$$

$$m_{\text{пр2}} = \frac{500}{213.80 - 208.00} \cdot \sin 90 = 86,21 \quad \text{м,}$$

Аналогично определим заложение левого склона (формула 4.6):

$$m_{\text{лев}} = \frac{L_{\text{лев}}}{H_{\text{лев}} - H_c} \cdot \sin \alpha \quad (4.6)$$

где  $L_{\text{лев}}$  – расстояние от левого водораздела до лога сооружения, м;

$H_{\text{лев}}$  – отметка левого водораздела по оси дороги, м;

$H_c$  – отметка лога у сооружения, м;

$\alpha$  – угол у сооружения, °.

$$m_{\text{лев}1} = \frac{2100}{190.00-122.00} \cdot \sin 90 = 30,88\text{м}$$

$$m_{\text{лев}2} = \frac{800}{216.00-208.00} \cdot \sin 90 = 100 \text{ м}$$

Зная географическое положение бассейна определяем номер ливневого района по СНиП 2.01.14 – 83. Номер ливневого района –6.

Определяем потери слоя стока на смачивание растительности по таблице в зависимости от ливневого района,  $z = 5$  мм.

Определяем коэффициент гидравлической шероховатости склона и коэффициент гидравлической шероховатости лога,  $m_c = 20$ ,  $m_l = 10$ .

Коэффициент заболоченности  $\sigma$ .

Так как водосборные площади не имеют заболоченных участков, то  $\sigma = 1$ .

При больших площадях бассейна, когда его ширина или длина более 5 км, вводится коэффициент неравномерности осадков  $\gamma = 1$ .

Коэффициент распластывания паводка  $\Pi = 1,0$ .

#### **Максимальный сток воды рек весеннего половодья**

Методы расчета максимальных расходов воды рек весеннего половодья, изложенные в настоящем разделе, следует применять при расчете для водосборов с площадями от элементарно малых (менее 1 км<sup>2</sup>) до 20000 км<sup>2</sup> на европейской и до 50000 км<sup>2</sup> на азиатской территориях РФ.

Расчетный максимальный расход воды весеннего половодья  $Q_{p\%}$  м<sup>3</sup>/с, заданной ежегодной вероятностью превышения  $P\%$  для равнинных и горных рек следует определять по формуле (4.7)

$$Q_{p\%} = \left[ \frac{K_0 h_{p\%} \mu \delta_1 \delta_2}{(A+A_1)^{n_1}} \right] A, \quad (4.7)$$

где  $K_0$  - параметр, характеризующий дружность весеннего половодья, определяемый по таблице 15.5 [8], для лесостепной зоны Европейской территории России принимается равным 0.02;

$h_{p\%}$  - расчетный слой суммарного весеннего стока (без срезки грунтового питания), мм, ежегодной вероятностью превышения  $P\%$ , определяемый в зависимости от коэффициента вариации  $C_v$  и отношения  $C_s/C_v$  этой величины, а также среднего многолетнего слоя стока  $h_0$ , устанавливаемого по рекам-аналогам или интерполяцией;

$$h_p = h K_p \quad (4.8)$$

$h$  - средний многолетний слой стока, определяется по карте 15.3 [1], с учетом поправочного коэффициента 1.1, принимается равным 88.

$K_p$  - модульный коэффициент, учитывающий вероятность превышения паводка и зависящий от коэффициента вариации  $C_v$  асимметрии  $C_s$ .

$C_v$  - принимается по карте 15.4 коэффициентов слоев стока талых, для Курской области принимается равным 0,5, вводится поправочный коэффициент равным 1.25, для площадей водосбора менее 50 км<sup>2</sup> [8].  $C_v = 0.63$ .

$C_s = 3C_v = 1,89$  -для северо-запада, где выпадают средние дожди, [8].

$K_p$  -по рис. 15.5 [1] кривые модульных коэффициентов слоев стока, принимаем равным 3.00.

$$h_p = 88 * 3.00 = 264,00 \text{ мм.}$$

$m$  - коэффициент, учитывающий неравенство статистических пара метров слоя стока и максимальных расходов воды, принимаемый по рекомендуемому прил. 7 [8] равным 1;  
 $d$  - коэффициент, учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер, принимаем равным 1 [8];

$d_1$  - коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в залесенных бассейнах, принимаем равным 1 [8];

$d_2$  - коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в заболоченных бассейнах, принимаем равным 1 [8];

$A_1$  - дополнительная площадь водосбора, учитывающая снижение редуции, км<sup>2</sup>, принимаемая по рекомендуемому прил. 8 равным 2 [8];

$n_1$  - показатель степени редуции, принимаемый по рекомендуемому прил. 8 равным 0.25 [8].

$$Q_{p2\%1} = \left[ \frac{0.02 \cdot 264 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{(2.01+2)^{0.25}} \right] \cdot 2.01 = 8.24 \text{ М}^3/\text{с}.$$

$$Q_{p2\%2} = \left[ \frac{0.02 \cdot 264 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{(0.44+2)^{0.25}} \right] \cdot 0.44 = 2.04 \text{ М}^3/\text{с}.$$

#### Максимальный сток воды рек дождевых паводков

Максимальные мгновенные расходы воды рек дождевых паводков  $Q_{p\%}$ , м<sup>3</sup>/с, для водосборов с площадями, указанными в рекомендуемом прил. 17 [8], следует определять по формуле (4.9) предельной интенсивности стока

$$Q_p = q_{1\%}^* \varphi H_{1\%} \delta \lambda_p F \quad (4.9)$$

где  $q_{1\%}^*$  - максимальный модуль стока ежегодной вероятности превышения  $P = 1\%$ , определяемый по рекомендуемому прил. 21 [8];

$H_{1\%}$  - максимальный суточный слой осадков вероятностью превышения  $P = 1\%$ , определяемый по данным ближайших к бассейну исследуемого водотока метеорологических станций, имеющих наибольшую длительность наблюдений принимаем равным 100 [8];

$j$  - сборный коэффициент стока, определяемый по формуле (4.11);

$l_{p\%}$  - переходный коэффициент от максимальных мгновенных расходов воды ежегодной вероятности превышения  $P = 1\%$  к максимальным расходам воды другой вероятности превышения, принимаемый по рекомендуемым прил. 19 и 20 [8] равным 0,82;

$A$  - площадь водосбора

Гидроморфометрическая характеристика русла исследуемой реки определяется по формуле (4.10)

$$\Phi_{ск} = \frac{(1000 \cdot L_{ск})^{0.5}}{n_{ск} \cdot i_{с}^{0.25} \cdot (\varphi \cdot H_1)^{0.5}} \quad (4.10)$$

где  $L_{ск}$  - средняя длина безрусловых склонов водосборов;

$n_{ск}$  - коэффициент, характеризующий шероховатость склонов водосбора, принимаемый по рекомендуемому прил. 26 [8] равный 0,3;

$i_{с}$  - средний уклон водосбора;

$j$  - сборный коэффициент стока для равнинных рек при отсутствии рек-аналогов определяется по формуле (4.11):

$$\varphi = \frac{c_2 \varphi_0}{(A+1)^{n_5}} \cdot \left( \frac{i_{с}}{50} \right)^{n_5} \quad (4.11)$$

где  $C_2$  - эмпирический коэффициент, принимаемый равным 1.3 для лесостепной зоны [8].

$j_0$  - сборный коэффициент стока для водосбора, со средним уклоном водосбора  $i_b = 39\text{‰}$ , принимается по рекомендуемому прил. 24 [8], равным 0.54.

$n_5$  - эмпирический коэффициент, принятый по прил 24 [8], равный 0,7;

$$\varphi_1 = \frac{1.3 \cdot 0.54}{(2.01+1)^{0.7}} \cdot \left(\frac{39}{50}\right)^{0.7} = 0,27;$$

$$\varphi_2 = \frac{1.3 \cdot 0.54}{(0.44+1)^{0.7}} \cdot \left(\frac{39}{50}\right)^{0.7} = 0,46;$$

Определяем длину главных логов. Главный лог – расстояние от водопропускного сооружения до верхней точки водосборного бассейна:

$$L_1 = 3,125\text{км};$$

$$L_2 = 0,325\text{км};$$

Определяем густоту речной сети водосбора, формула (4.12):

$$P = \frac{\sum L}{A} \quad (4.12)$$

где  $L$  – длина главного лога;

$A$  – водосборная площадь

$$P_1 = \frac{3.125}{2.01} = 1,55\text{км/км}^2;$$

$$P_2 = \frac{0,325}{0,44} = 0,74\text{км/км}^2;$$

Определяем среднюю длину безрусловых склонов водосборов, формула (4.13):

$$L_{\text{ск}} = \frac{1,0}{1,8 \cdot P} \quad (4.13)$$

$$L_{\text{ск1}} = \frac{1,0}{1,8 \cdot 1,55} = 0,36;$$

$$L_{\text{ск2}} = \frac{1,0}{1,8 \cdot 0,74} = 0,75;$$

Определяем гидроморфометрические характеристики склонов водосборов по формуле (4.10):

$$\Phi_{\text{ск1}} = \frac{(1000 \cdot 0,36)^{0,5}}{0,3 \cdot 39^{0,25} \cdot (0,27 \cdot 100)^{0,5}} = 4,87;$$

$$\Phi_{\text{ск2}} = \frac{(1000 \cdot 0,75)^{0,5}}{0,3 \cdot 10^{0,25} \cdot (0,46 \cdot 100)^{0,5}} = 7,57;$$

Определяем продолжительность склонного добега воды по рекомендуемому прил. 25 [8]:

$$\tau_1 = 39 \text{ мин};$$

$$\tau_2 = 85 \text{ мин};$$

Определяем средневзвешенный уклон русел водосборов по формуле (4.14):

$$i_p = 0,5 \left( \frac{h_{\text{л}}}{l_{\text{л}}} + \frac{h_{\text{п}}}{l_{\text{п}}} \right) 1000 \quad (4.14)$$

где  $h_{\text{л}}$ ,  $h_{\text{п}}$  – высота левого и правого водораздела;

$l_{\text{л}}$ ,  $l_{\text{п}}$  – длина склонов водосборного бассейна.

$$i_{p1} = 0,5 \left( \frac{68}{2100} + \frac{94}{1900} \right) 1000 = 40,93\text{‰};$$

$$i_{p2} = 0,5 \left( \frac{8}{800} + \frac{5,8}{500} \right) 1000 = 10,8\text{‰};$$

Определяем гидроморфологические характеристики русел водосбросов, формула (4.15):

$$\Phi_p = \frac{1000 \cdot L}{\chi_p \cdot i_p^x \cdot A^{0,25} \cdot (\varphi \cdot H_1)^{0,5}} \quad (4.15)$$

где  $\chi_p$  – гидравлический параметр русла, принимаемый по рекомендуемому прил. 18 [8], равным 11;

$L$  – длина главного лога;

$\chi$  – параметр, определяемый по рекомендуемому прил. 18 [8], равный 0,33;

$i_p$  – средневзвешенный уклон русла реки;

$\varphi$  – сборный коэффициент стока для равнинных рек при отсутствии рек-аналогов [8];

$A$  – водосбросная площадь.

$$\Phi_{p1} = \frac{1000 \cdot 3,125}{11 \cdot 0,93^{0,33} \cdot 2,01^{0,25} \cdot (0,27 \cdot 100)^{0,5}} = 13,49 ;$$

$$\Phi_{p2} = \frac{1000 \cdot 0,325}{11 \cdot 10,8^{0,33} \cdot 0,44^{0,25} \cdot (0,46 \cdot 100)^{0,5}} = 2,44 ;$$

Определяем максимальный мгновенный модуль стока ежегодной вероятности превышения 1% по рекомендуемому прил. 21 [8]:

$$q'_1 = 0,21 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q'_2 = 0,12 \text{ м}^3/\text{с};$$

Определяем максимальный мгновенный расход воды от дождевых паводков заданной ежегодной вероятности превышения 2%:

$$Q'_1 = 0,21 \cdot 0,27 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 0,82 \cdot 2,01 = 9,35 \text{ м}^3/\text{с} ;$$

$$Q'_2 = 0,12 \cdot 0,46 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 0,82 \cdot 0,44 = 1,99 \text{ м}^3/\text{с} ;$$

К расчету принимаем максимальный расход воды, т.е. дождевого паводка.

## Практическое занятие №9

### Гидрометрические расчеты при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений

**ЗАДАНИЕ 1: Произвести расчет отверстия трубы.**

**ЗАДАНИЕ 2: Произвести расчет отверстия моста.**

**Ход выполнения:**

На основании расчетов выполненных в ходе Практического занятия №8 выполняем задания №1 и №2.

#### Расчет отверстий труб с учетом аккумуляции воды у сооружения

Аккумуляция учитывается во всех случаях расчета по преобладающему ливневому стоку. В результате аккумуляции воды перед трубой образуется пруд. Время прохождения воды через трубу увеличивается по сравнению с продолжительностью паводка, вследствие чего происходит снижение расчетного сбросного расхода в сооружении по сравнению с максимальным паводочным расходом, что приводит к значительному уменьшению отверстия трубы.

Вычисляется объем стока, по формуле (4.16):

$$W = 60000 \cdot \frac{a_{\text{час}} \cdot A \cdot \alpha \cdot \varphi}{\sqrt{k_t}} \quad (4.16)$$

где  $a_{\text{час}}$  - интенсивность ливня часовой продолжительности в зависимости от ливневого района и вероятности превышения максимальных расходов расчетных паводков, мм/мин. По табл. 15.1. [1]  $a_{\text{час}} = 0,89$ ;

$\varphi$  - коэффициент редукции;

$k_t$  - коэффициент перехода от интенсивности ливня часовой продолжительности к интенсивности ливня расчетной продолжительности. Определяется по табл. 15.2 [1].

$\alpha$  - коэффициент потерь потока, зависящий от площади бассейна.

Объем пруда при различных величинах подпора, определяется по формуле (4.17):

$$W_{\text{пр}} = \frac{m_1 + m_2}{6 \cdot i_n} H^3 \quad (4.17)$$

где  $H$  - максимальная глубина в пониженной точке живого сечения при расчетном уровне подпертых вод, м;  $\alpha = 0,98$

$m_1, m_2$  - крутизна склонов лога (4.18);

$i_n$  - средний уклон водосбора

$$m_1 + m_2 = \frac{L_1}{H_1 - H_0} + \frac{L_2}{H_2 - H_0} \quad (4.18)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - расстояние от правого и левого водораздела до лога сооружения;

$H_1$  и  $H_2$  - отметка правого и левого водораздела по оси дороги;

$H_0$  - отметка лога у сооружения

Расход воды в сооружении с учетом аккумуляции определяется по формуле (4.19):

$$Q = Q' \cdot \lambda \quad (4.19)$$

где  $Q'$  - максимальный расход воды;

$\lambda$  - коэффициент аккумуляции.

Коэффициент аккумуляции зависит от отношения, формула (4.20):

$$W_{\text{пр}}/W \quad (4.20)$$

Труба

$$W_1 = 60000 \frac{0,89 \cdot 0,44 \cdot 0,5 \cdot 0,46}{\sqrt{3,93}} = 2725,8 \text{ М}^3 ;$$

$$m_1 + m_2 = \frac{800}{216,00 - 208,00} + \frac{500}{213,80 - 208,00} = 186,21;$$

$$W_{\text{пр1}} = \frac{186,21}{6 \cdot 0,011} \cdot 0,98^3 = 2652,08 \text{ М}^3 ;$$

$$W_{\text{пр}}/W = \frac{2652,08}{2725,8} = 0,97$$

При  $W_{\text{пр}}/W = 0,97$ , тогда  $\lambda_1 = 0,04$  [9], определяем значение  $Q$ , согласно формуле (4.19):

$$Q = 2,04 \cdot 0,04 = 0,0816 \text{ м}^3/\text{с}$$

К этим параметрам подходит труба 1,25 м [9].

Определяем отметку подпертого горизонта, отнесенную к бровке земляного полотна (формула 4.20):

$$\text{ГПВ} = O + H_{\text{пр}} + \frac{B}{2} \cdot i_0 \quad (4.20)$$

где  $O$  – отметка трубы по оси дороги;

$H_{\text{пр}}$  – глубина пруда;

$B$  – ширина земляного полотна поверху;

$i_0$  – уклон лога у сооружения.

$$\text{ГПВ} = 208,00 + 0,98 + \frac{12}{2} \cdot 0,02833 = 209,15 \text{ м};$$

Минимальная высота насыпи по верховой бровке принимается исходя из формулы (4.21):

$$H_{\text{нас}}^{\text{мин}} = d + S + 0,5 + \frac{B}{2} \cdot i_0 + O \quad (4.21)$$

где  $d$  – высота трубы в свету;

$S$  – толщина стенки трубы, м;

0,5 — минимальная толщина засыпки над звеньями трубы, принимаемая для всех типов труб на автомобильных и городских дорогах равной 0,5 м (считая от верха трубы до низа дорожной одежды);

$O$  – отметка трубы по оси дороги

$$H_{\text{нас}}^{\text{мин}} = 1,25 + 0,14 + 0,5 + \frac{12}{2} \cdot 0,02833 + 208,00 = 210,06 \text{ м};$$

Длина трубы при постоянной крутизне откосов насыпи, определяется по формуле (4.22):

$$L_{\text{тр}} = (H_{\text{нас}} - d - S) \cdot 2m + B \quad (4.22)$$

$$L_{\text{тр1}} = (11,37 - 1,5 - 0,14) \cdot 2 \cdot 1,75 + 12 \approx 46 \text{ м}$$

### Расчет отверстий мостов

#### 1. Определяем бытовую глубину :

Бытовую глубину определяем методом последовательных приближений из уравнения

$$Q = w \cdot v \quad (4.24)$$

где  $w$  – площадь живого сечения водотока при заданной величине;

$v$  – допускаемая скорость по грунту (типу укрепления 0.9)

$$w = \frac{4000}{2} \cdot 0,0056 = 11,2$$

где  $h_6 = 0,0053$  (м) – бытовая глубина

$$9,35 \approx 11,2 \cdot 0,9$$

#### 2. Определяем критическую глубину :

$$h_{\text{кр}} = \frac{v^2}{g} \quad (4.25)$$

$$h_{\text{кр}} = \frac{0,9^2}{9,8} = 0,083$$

Сравним  $h_b$  и  $h_{кр}$  на условие свободного протекания воды под мостом

$$h_b \leq \frac{1}{3} \cdot h_{кр} \quad (4.26)$$

$$0,0056 \leq \frac{1}{3} \cdot 0,083$$

$$0,0056 \leq 0,028$$

Условие выполняется, значит дальнейший расчет ведем по условию свободного протекания воды под мостом.

**3. Определяем подпор перед мостом:**

$$H = \left(1 + \frac{1}{2 \cdot \varphi^2}\right) \cdot h_{кр} \quad (4.27)$$

где  $\varphi$  - коэф. скорости (0,9)

$$H = \left(1 + \frac{1}{2 \cdot 0,9^2}\right) \cdot 0,083 = 0,125$$

Зная подпор определяем сбросной расход

$$Q_{сбр} = Q_{рас} \cdot \lambda \quad (4.19)$$

$$W = 60000 \cdot \frac{a_{час} \cdot F \cdot \alpha \cdot \varphi}{\sqrt{k_t}} \quad (4.17)$$

Мост

$$W_M = 60000 \frac{0,89 \cdot 2,01 \cdot 0,5 \cdot 0,46}{\sqrt{0,56}} = 32989,15 \text{ м}^3$$

Мост

$$m_1 + m_2 = \frac{2100}{190,00 - 122,00} + \frac{1900}{216,00 - 122,00} = 51,09 \text{ м};$$

$$W_{прм} = \frac{51,09}{6 \cdot 0,039} \cdot 3,0^3 = 5895 \text{ м}^3 ;$$

$$W_{пр}/W \quad (4.20)$$

$$W_{пр}/W = \frac{5895}{32989,15} = 0,18$$

При  $W_{пр}/W = 0,18$ , тогда  $\lambda_1 = 0,73$  [9], определяем значение  $Q$ , согласно формуле (4.19):

$$Q_{сбр} = 9,35 \cdot 0,73 = 6,83$$

**3. Определяем отверстие моста:**

$$B = \frac{Q_{сбр}}{1,33 \cdot H^{3/2}} \quad (4.28)$$

$$B = \frac{6,83}{1,33 \cdot 0,125^{3/2}} = 116,22$$

Полученное отверстие моста округляем до ближайшего типового в большую сторону.

Принимаем к расчету отверстие моста с длиной 120 м и длиной пролетов по 24 м.

Принятое к строительству отверстие моста провоцирует новую высоту подпора ( $H$ ), поэтому пересчитываем подпор перед мостом.

$$H = 0,83 * \left(\frac{Q_{сбр}}{B_{проект}}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = 0,83 * \left(\frac{6,83}{120}\right)^{\frac{2}{3}} = 0,123$$

После определения отверстия моста определяем отметку подпертого горизонта вод ПГВ.

$$\nabla_{\text{ПГВ}} = \nabla_{\text{О}} + \text{Н}$$

$$\nabla_{\text{ПГВ}} = 122,00 + 0,123 = 122,123$$

Где – О отметка русла реки по оси моста

Определяем минимальную отметку оси моста:

$$\nabla H_{\text{моста } \min} = \nabla_{\text{ПГВ}} + \text{С} + \text{К}$$

$$\nabla H_{\text{моста } \min} = 122,123 + 1,0 + 1,20 + 0,65 = 124,973$$

где С- это возвышение низа пролетного строения над отметкой ПГВ. Минимальное расстояние = 1 м для несудоходных рек, служащее для пропуска ледохода

К- это конструктивная высота пролетного строения, выбирается по таблицам в зависимости от длины пролетного строения. К = 1,20

Рассчитываем минимальную отметку бровки земполотна у моста:

$$\nabla H_{\text{БП}}^{\min} = \nabla H_{\text{моста } \min} - \varphi$$

$$\nabla H_{\text{БП}}^{\min} = 124,973 - 0,24 = 124,733$$

где  $\varphi$  - стрела выпуклости равная :  $\varphi = \text{В} * i_{\text{пч}} + \text{А} * i_{\text{об}}$

$$\varphi = 7 * 0,02 + 2,5 * 0,04 = 0,24$$

Наносим проектную линию и меняем  $\nabla H_{\text{БП}}^{\min}$  минимальную отметку бровки земполотна у моста.

$$\nabla H_{\text{БП}}^{\min} =$$

После нанесения проектной линии определяем длину моста:

$$L_{\text{моста}} = \text{В проект} + 2 * m * \left( \nabla H_{\text{БП}}^{\text{получен}} - \frac{\text{Н}}{2} \right) + \text{Н} * \text{Д} + 2 * \text{Г}$$

$$L_{\text{моста}} = \text{В проект} + 2 * m * \left( \nabla H_{\text{БП}}^{\text{получен}} - \frac{\text{Н}}{2} \right) + \text{Н} * \text{Д} + 2 * \text{Г}$$

где - **В проект** принятое проектное отверстие моста

Н –подпор перед мостом

Н –число промежуточных опор

Д –ширина опоры

Г –расстояние от вершины конуса до начала моста. Г = 0,75.