

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра горных транспортных машин**

## **ГИДРОМЕХАНИКА**

*Методические указания к практическим занятиям*  
*для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2020**

УДК 656(073)

**ГИДРОМЕХАНИКА:** Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *С.Л. Сержан, М.А. Васильева*. СПб, 2020. 38 с.

В методических указаниях к практическим занятиям рассмотрены основные вопросы гидравлического расчета напорных трубопроводов, включая последовательное и параллельное соединение простых трубопроводов, трубопроводов с путевой раздачей и распределительные сети. Изложен алгоритм гидравлического расчета напорного трубопровода на примере распределительной сети.

Предназначены для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации «Горные машины и оборудование», «Транспортные системы горного производства», «Открытые горные работы», «Электрификация и автоматизация горного производства».

Научный редактор проф. *В.И. Александров*

Рецензент канд. техн. наук *В.П. Пироженко* (Научно-производственная компания «Провита»)

## ВВЕДЕНИЕ

*Гидравлика* – механика жидкости (гидромеханика) – является общепрофессиональной дисциплиной, при изучении которой студенты знакомятся с физическими свойствами жидкости, основными законами кинематики, гидростатики и гидродинамики.

Расчет гидравлического трубопровода по дисциплине «Гидромеханика» способствует обобщению и закреплению теоретических знаний студентов, имеет целью развитие навыков самостоятельной творческой работы студентов, пользования справочной литературой, выполнения расчетов.

В методических указаниях для практических работ рассматриваются гидравлически длинные и короткие трубопроводы, последовательное и параллельное соединение простых трубопроводов, трубопроводы с путевой раздачей и распределительные сети.

## 1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Все трубопроводы можно разделить на простые и сложные. **Простым** является трубопровод, состоящий из труб одинакового диаметра, выполненный из одного и того же материала без ответвлений. **Сложным** – являются все остальные трубопроводы, состоящие из ряда простых, соединенных последовательно или параллельно.

В зависимости от отсутствия и наличия свободной поверхности трубопроводы делятся на **напорные** и **безнапорные**. В напорных трубопроводах свободная поверхность отсутствует, и трубопроводы работают полными сечениями.

В зависимости от соотношения потерь напора трубопроводы делятся на гидравлически длинные и короткие. В **длинных** трубопроводах влияние местных потерь напора невелико и ими можно пренебречь или принять ориентировочно равными 5-10% от потерь напора по длине. **Короткими** называют трубопроводы, в которых местные потери напора составляют более 10% от потерь напора на трение.

Основными уравнениями для гидравлического расчета напорных трубопроводов являются:

- уравнение Бернулли, которое выражает баланс удельных энергий в сечениях трубопровода:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2} \quad (1)$$

где:  $Z$  – удельная потенциальная энергия положения жидкости (геометрический напор), м;  $\frac{P}{\rho g}$  – удельная потенциальная энергия

давления жидкости (пьезометрический напор), м;  $\frac{v^2}{2g}$  – удельная кинетическая энергия жидкости (скоростной напор), м;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий влияние неравномерности распре-

деления скоростей по живому сечению;  $\alpha = 1 \dots 1,1$  - для турбулентного режима движения жидкости,  $\alpha = 2$  - для ламинарного;  $\Delta h_{1-2}$  - потери полного напора между рассматриваемыми сечениями, м, при рассмотрении длинных трубопроводов местными потерями напора можно пренебречь, тогда  $\Delta h_{1-2} = \Delta h_l$ .

- уравнение неразрывности, которое выражает баланс расхода жидкости в сечениях трубопровода:

$$v_1 \cdot \omega_1 = v_2 \cdot \omega_2 = \dots v_n \cdot \omega_n = Q = const \quad (2)$$

где:  $\omega$  - живое сечение потока, м<sup>2</sup>;  $v$  - средняя скорость потока в живом сечении  $S$ , м/с;  $Q$  - объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с.

- уравнение Дарси-Вейсбаха, которое выражает потери удельной энергии на трение (потери напора по длине):

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l \cdot v^2}{d \cdot 2g} \quad (3)$$

где:  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения, в зависимости от режима движения жидкости в трубопроводе  $\lambda = f(Re, \varepsilon)$ ;  $l$  - длина участка трубопровода, на котором определяются потери, м;  $d$  - диаметр участка трубопровода, м;  $v$  - скорость потока жидкости, м/с;  $Re$  - число Рейнольдса;  $\varepsilon$  - относительная шероховатость.

Формулу (3) можно привести к таким выражениям:

$$\Delta h_l = \frac{Q^2}{K^2} l = i \cdot l; \quad (4)$$

$$\Delta h_l = A l Q^2; \quad (5)$$

$$\Delta h_l = a Q^2, \quad (6)$$

где  $Q$  - объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $A$  - удельное сопротивление трубопровода, с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>;  $K$  - расходная характеристика, м<sup>3</sup>/с;  $a$  - полное сопротивление трубопровода, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;  $i$  - гидравлический уклон;

$$A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} = \frac{1}{K^2} \quad (7)$$

$$K = \sqrt{\frac{g\pi^2 d^5}{8\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (8)$$

$$a = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} l = \frac{l}{K^2} \quad (9)$$

Для гидравлически длинных трубопроводов можно пренебречь кинетической составляющей уравнения Бернулли, так как  $v^2/2g \ll \Delta h_l$ . Тогда разность пьезометрических высот в рассматриваемых сечениях трубопровода будет примерно равна потерям энергии  $\Delta h_l$ , и уравнение (1) примет вид:

$$\Delta H = \Delta h_l = \left( z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) \quad (10)$$

Параметры  $A$ ,  $K$  и  $a$  не зависят от числа Рейнольдса  $Re$ , если трубопровод работает в области **квадратичного закона сопротивления**, но зависят от диаметра трубы  $d$  и шероховатости ее стенок  $\Delta_s$ .

В табл.1 даны значения  $K_4$  (четвертая зона) для стальных труб при  $\Delta_s = 0,02$  мм (новые трубы) и  $\Delta_s = 0,2$  мм (трубы после нескольких лет эксплуатации или старые), а также для чугунных труб при  $\Delta_s = 0,2$  мм (новые) и  $\Delta_s = 1$  мм (старые).

Таблица 1

d, мм	Расходная характеристика $K_4$ , л/с			
	Трубы стальные		Трубы чугунные	
	Новые	Старые	Новые	Старые
50	15,2	11,4	11,4	9,3
75	44,4	33,3	33,3	27,2
100	96,1	72,0	72,0	58,9
125	172,4	129,5	129,5	105,9
150	278,9	209,0	209,0	170,9
200	593,0	444,3	444,3	364,0
250	1065	798,8	798,8	652,8

Продолжение таблицы 2

$d, \text{мм}$	Расходная характеристика $K_d$ , л/с			
	Трубы стальные		Трубы чугунные	
	Новые	Старые	Новые	Старые
300	1718	1288	1288	1055
350	2572	1933	1933	1581
400	3656	2739	2739	2243
450	5061	3734	3734	3055
500	6571	4921	4921	4027

Часто трубопроводы работают не в квадратичной области сопротивления. Установить область можно, зная число Рейнольдса  $Re$ , диаметр  $d$  и шероховатость  $\Delta$ , трубы по следующей ориентировочной цепочке соотношений:

$$0 \dots I \dots 2320 \dots II \dots 10d/\Delta, \dots III \dots 500d/\Delta, \dots IV \quad (11)$$

**Область I** соответствует ламинарному режиму. Коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Стокса:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (12)$$

При совместном решении уравнений (3) и (12) можно получить формулу для определения потерь при ламинарном режиме течения:

$$\Delta h_l = 32 \frac{l\nu}{gd^2} = \frac{128\nu}{g\pi d^4} lQ = K_l lQ \quad (13)$$

где  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $v$  — средняя скорость потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $l$  - длина рассматриваемого участка трубопровода,  $\text{м}$ ;  $Q$  - объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $K_l = 128\nu/g\pi d^4$  - расходная характеристика для ламинарного режима.

**Область II** соответствует зоне гидравлически гладких труб. Коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}}, \quad (14)$$

**Область III** – переходная зона от гидравлически гладких к гидравлически шероховатым трубопроводам. Коэффициент гидравлического трения рекомендуется определять по универсальной для турбулентного режима формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (15)$$

**Область IV** – квадратичная (зона гидравлически шероховатых труб). Коэффициент гидравлического трения определяется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}, \quad (16)$$

Убедившись на основании анализа цепочки (11), что рассматриваемый трубопровод работает не в квадратичной зоне, следует ввести на потери энергии (4) поправку  $\psi > 1$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_l &= \psi \frac{Q^2}{K_4^2} l \\ \psi &= \left( 1 + \frac{68\nu}{g\Delta_3} \right)^{0,25} = \left( 1 + \frac{68}{\text{Re}} \frac{d}{\Delta_3} \right)^{0,25} = m^{0,25} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где

$$m = 1 + 68\nu/(\nu\Delta_3) = 1 + 68d/(\text{Re}\Delta_3) \quad (18)$$

или уменьшить модуль расхода  $K_4$  (табл.1) в соответствии с формулой:

$$K_3 = K_4 m^{-0,125} \quad (19)$$

При расчете гидравлически короткого трубопровода суммар-



ные потери напора складываются из потерь напора по длине и местных потерь  $\Delta h_M$  :

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{1-2} &= \Delta h_l + \Delta h_M \\ \Delta h_{1-2} &= \left( \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} \cdot l + \frac{8}{g\pi^2 d^4} \cdot \sum \zeta \right) \cdot Q^2 \\ \Delta h_{1-2} &= (A_L l + A_M \sum \zeta) \cdot Q^2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где  $A_M = \frac{8}{g\pi^2 d^4}$  – удельное сопротивление трубопровода в местных сопротивлениях,  $\text{с}^2/\text{м}^5$ ;  $A_L = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5}$  – удельное сопротивление трубопровода по длине  $\text{с}^2/\text{м}^6$ ;  $\sum \zeta$  – сумма местных гидравлических сопротивлений.

В практике расчета гидравлически коротких трубопроводов местные потери напора принято заменять эквивалентной длиной  $l_{\text{э}}$  :

$$l_{\text{э}} = 0,082 \cdot \frac{\sum \zeta \cdot K^2}{d^4} \quad (21)$$

Тогда потери напора в гидравлически коротком трубопроводе определяются следующим выражением:

$$\Delta h = \frac{l + l_{\text{э}}}{K^2} \cdot Q^2 \quad (22)$$

При рассмотрении сложного трубопровода, состоящего из **последовательно** соединенных простых трубопроводов полную потерю напора (энергии) определяют по формуле:

$$\Delta h_l = Q^2 \sum \left( l_i / K_i^2 \right) = Q^2 \sum a_i = Q^2 \sum (A_i l_i) \quad (23)$$

Потери напора на каждом участке определяются формулой (4).

При **параллельном** соединении простых трубопроводов потери напора в отдельных ветвях равны, т.е.  $\Delta h_{l1} = \Delta h_{l2} = \Delta h_{l3}$  и т.д., а расходы  $Q_i$  распределяются по отдельным ветвям согласно зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{K_1}{K_2} \sqrt{\frac{l_2}{l_1}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_1 l_1}} \\ \frac{Q_1}{Q_3} &= \frac{K_1}{K_3} \sqrt{\frac{l_3}{l_1}} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Когда жидкость расходуется из трубопровода во многих его точках (путевой расход или непрерывная раздача), потеря напора определяется формулой:

$$\Delta h_l = 0,333 Q_0^2 l / K^2 \quad (25)$$

где  $Q_0$ - начальный расход, непрерывно и равномерно расходуемый по длине трубы.

Если часть расхода проходит по трубе транзитом  $Q_{тр}$ , а часть непрерывно расходуется по длине трубы  $Q_0$ , то общая потеря напора:

$$\Delta h_l = (Q^2 - Q Q_0 + 0,333 Q_0^2) / K^2 ; Q = Q_{тр} + Q_0 \quad (26)$$

Объяснение структуры и сути **распределительных сетей** производится на примере порядка расчета сети для расчетно-графической работы (РГР).

## 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

На рис.1 дан пример распределительной сети.

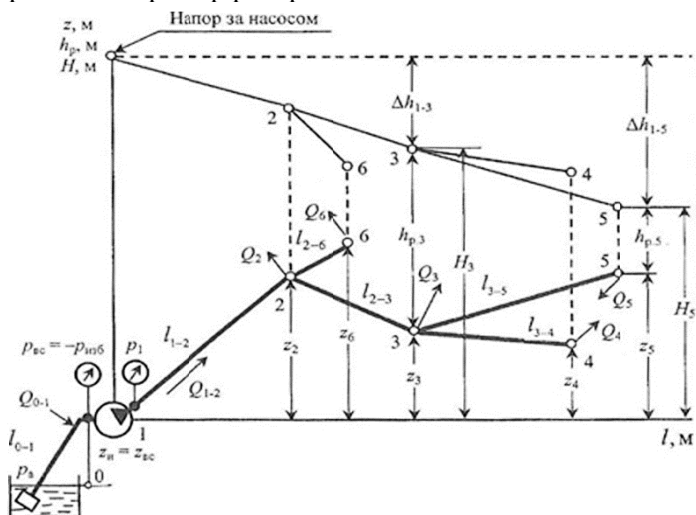


Рис. 1 – Схема распределительной сети

В соответствии с заданием (**приложение 2**) в пределах РГР необходимо:

1. построить в масштабе по координатам  $l$  (длина) и  $z$  (геодезическая отметка) профиль трассы;
2. определить диаметры участков трубопровода, рассчитать пьезометрические ( $H$ ) и рабочие ( $h_p$ ) напоры в заданных точках сети и построить пьезометрическую линию (ПЛ). Ось ординат должна быть общая для  $z$ ,  $H$  и  $h_p$ ;
3. определить высоту установки насоса над уровнем воды в зумпфе (высоту всасывания  $z_n$ ) и мощность  $N_{дв}$  на валу центробежного насоса (мощность приводного двигателя).

Для задания, представленного в **приложении 3** необходимо выполнить только п.1 и п.2

**Задано:**

1. узловые расходы  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ ;
2. геодезические отметки пунктов потребления  $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6$ ;
3. длины участков  $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{45}, l_{26}$ ;
4. коэффициенты местных сопротивлений для каждого участка трубопровода  $\zeta_{1-2}, \zeta_{2-3}, \zeta_{3-4}, \zeta_{4-5}, \zeta_{2-6}, \zeta_{0-1}$
5. рабочий напор  $h_{\text{зад}}$ , ниже которого не может быть фактический, полученный расчетом рабочий напор  $h_p$  ( $h_{\text{зад}}$  задается дополнительно);
6. коэффициент полезного действия (КПД) насоса  $\eta_n$ ;
7. частота вращения рабочего колеса насоса  $n$ , об/мин;
8. вид труб (табл. 1) (задается дополнительно).
9. температура воды  $\Theta$  (задается дополнительно).

Для задания, представленного в **приложении 3**, п.6 и п.7 не задается.

**Выбор магистрали**

В магистраль должны входить последовательно соединенные участки простых трубопроводов, образующие наиболее нагруженную по расходу и наиболее протяженную линию.

Согласно рис.1 в магистраль входят участки 0-1 и 1-2, далее необходимо сравнить между собой направления 2-6, 2-3-4 и 2-3-5.

Пусть в рассматриваемом примере  $(\sum Q)_{\text{max}}$  и  $(\sum l)_{\text{max}}$  относятся к направлению 2-3-5. Тогда магистралью является сеть из участков: 0-1, 1-2, 2-3, 3-5. Участки 2-6 и 3-4, не вошедшие в магистраль, являются ветвями.

Расчет магистрали следует начинать с наиболее удаленного от насоса участка, которым в примере является участок 3-5, и далее рассчитывать участки последовательно против потока (2-3; 1-2; 0-1). Определить транзитные расходы на участках:

$$Q_{3-5} = Q_5; Q_{3-4} = Q_4; Q_{2-6} = Q_6; Q_{2-3} = Q_3 + Q_4 + Q_5;$$

$$Q_{0-1} \approx Q_{1-2} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

### **Расчет последнего участка магистрали**

Для примера примем участок 3-5.

Предварительно определить диаметр  $d'_{3-5}$ , используя рекомендацию об ориентировочных скоростях жидкости:

- при  $Q= 6-50$  л/с -  $v_{np} = 0,7-1,0$  м/с;
- при  $Q= 50-120$  л/с -  $v_{np} = 1,0-1,4$  м/с;

$$d'_{3-5} = \sqrt{4Q_{3-5}/\pi v_{np}} = 1,13\sqrt{Q_{3-5}/v_{np}}.$$

Далее по табл.1 следует выбрать ближайшее к  $d'_{3-5}$  значение  $d_{3-5}$  и соответствующий ему модуль расхода  $K'_{3-5}$  для заданного вида труб, который до уточнения является приблизительной величиной. Определить фактическую скорость жидкости на данном участке:

$$v_{3-5} = 4Q_{3-5}/\pi d_{3-5}^2. \quad (27)$$

Определить число Рейнольдса по выражению:  $Re = \frac{vd}{\nu}$ , и вязкость для воды при заданной температуре (приложение 1).

Установить фактическую область сопротивления, используя рекомендации к цепочке (11). Если  $Re > 500d_{3-5}/\Delta_3$ , найденный по табл.1 модуль расхода  $K'_{3-5}$  должен быть принят для дальнейших расчетов. Если  $Re < 500d_{3-5}/\Delta_3$ , следует определить поправку  $m$  по формуле (18) и откорректировать  $K'_{3-5}$  по формуле (19). Получим фактический модуль  $K_{3-5}$ .

Определить величину эквивалентной длины трубопровода на участке 3-5  $l_{\Sigma 3-5}$  по формуле (21).

Определить потери напора на участке 3-5  $\Delta h_{3-5}$  используя выражение (22).

Определить полный гидростатический напор в конце участка:

$$H_5 = z_5 + h_{зад}; \quad (28)$$

в начале участка:

$$H_3 = H_5 + \Delta h_{3-5} \quad (29)$$

Определить рабочий напор в начале участка

$$h_{p,3} = H_3 + z_3 \quad (30)$$

и сравнить его с  $h_{зад}$ :

- если  $h_{p,3} \geq h_{зад}$ , приступить к построению пьезометрической линии (ПЛ) по точкам  $H_5$  и  $H_3$ , далее - к расчету следующего участка магистрали (2-3) по изложенной методике.

- если  $h_{p,3} < h_{зад}$  следует определить величину недостающего напора:

$$\delta = h_{зад} - h_{p,3} \quad (31)$$

и на величину  $\delta$  поднять напоры в точках 3 и 5, после чего откорректировать ПЛ для участка 3-5. При этом рабочий напор  $h_{p,3}$  будет равен заданному  $h_{зад}$ , а напор  $h_{p,5}$  будет больше заданного.

При расчете последнего участка магистрали и ветви в пояснительную записку внести все пояснения к расчетным параметрам и формулам. При расчете остальных участков магистрали пояснения можно опустить.

### ***Расчет ветви***

Для примера примем ветвь 3-4.

Определить предварительно полный гидростатический напор в конце ветви - точка 4:

$$H'_4 = z_4 + h_{зад} \quad (32)$$

Значение аналогичного напора в начале ветви  $H_3$  было определено при расчете магистрали (29).

Диаметр труб на участке 3-4 ( $d_{3-4}$ ) определяется по величине

допустимой потери напора в ветви  $[\Delta h_{3-4}]$  следующим образом:

$$[\Delta h_{3-4}] = H_3 - H'_4 \quad (33)$$

Определить предварительное значение модуля расхода:

$$K'_{3-4} = Q_{3-4} \sqrt{\frac{l_{3-4}}{[\Delta h_{3-4}]}} \quad (34)$$

Далее по табл.1 следует найти для заданного вида труб ближайшее к  $K'_{3-4}$  большее значение модуля. Этому значению  $K$  соответствует значение искомого диаметра  $d_{3-4}$ .

Определить фактическую скорость жидкости  $v_{3-4}$ , используя (27); определить критерий  $Re$ , установить фактическую область сопротивления (11). Если  $Re > 500d_{3-4}/\Delta_3$ , найденный по табл.1 модуль  $K'_{3-4}$  принимается для дальнейших расчетов. Если  $Re < 500d_{3-4}/\Delta_3$ , следует определить поправку  $m$  (18) и откорректировать  $K'_{3-4}$  (19); получим фактический модуль  $K_{3-4}$ .

Определить величину эквивалентной длины трубопровода на участке 3-4  $l_{\text{э}3-4}$  по формуле (21).

Определить фактическую потерю напора  $\Delta h_{3-4}$  по (22).

Сравнить  $\Delta h_{3-4}$  с  $[\Delta h_{3-4}]$ . Если  $\Delta h_{3-4} < [\Delta h_{3-4}]$ , приступить к определению гидростатического напора  $H_4 = H_3 + \Delta h_{3-4}$  и построению ПЛ для участка 3-4. Если  $\Delta h_{3-4} > [\Delta h_{3-4}]$ , следует вернуться к табл.1. и выбрать следующее большее значение модуля  $K''_{3-4}$ . Для  $K''_{3-4}$  найти по табл.1 новый  $d_{3-4}$ , который будет больше ранее выбранного.

Повторить действия после формулы (34); найти новое значение потерь напора  $\Delta h_{3-4}$ , которое снова сравнить с  $[\Delta h_{3-4}]$ . Определить фактический напор в точке 4:

$$H_4 = H_3 + \Delta h_{3-4} \quad (35)$$

найти рабочий напор в точке 4  $h_{p,4}$  по формуле (30).

Сравнить  $h_{p,4}$  с  $h_{зад}$ . Если  $h_{p,4} < h_{зад}$ , следует определить  $\delta$  (31) и поднять  $H_3$ ,  $H_4$  и  $H_5$  на эту величину, при этом скорректировав ПЛ.

### **Определение приводной мощности насоса**

Мощность приводного двигателя (или мощность на валу насоса) определяется по формуле:

$$N_{дв} = \frac{\rho g H_n Q_{1-2}}{\eta_n} \quad (36)$$

где  $H_n$  - напор, создаваемый насосом;  $\eta_n$  - КПД насоса;

$$H_n = H_1 + Z_n + \frac{Q_{0-1}^2}{K_{0-1}^2} l_{0-1} + (\zeta_{0-1} + 1) \frac{v_{0-1}^2}{2g} \quad (37)$$

$H_1$  - напор на выходе из насоса, определен при расчете участка 1-2 магистрали;  $\zeta_{0-1}$  - суммарный коэффициент местных сопротивлений во всасывающей линии 0-1, (приложение 2 и 3); 0-1 - индексация параметров всасывающей линии;  $Z_n$  - предельно допустимая высота всасывания насоса по условиям его бескавитационной работы (для РГР - высота установки насоса над уровнем воды в зумпфе),

$$Z_n = \frac{p_a - p_{нп}}{\rho g} - \Delta h_{l_{0-1}} - \Delta h_{m_{0-1}} - [\Delta h]_к \quad (38)$$

где  $p_a$  - атмосферное давление;  $p_{нп}$  - давление насыщенных паров [1];  $\Delta h_{l_{0-1}}$  - потери напора по длине всасывающего трубопровода (4);  $\Delta h_{m_{0-1}}$  - местные потери напора;  $v_{0-1}$  - средняя скорость жидкости во всасывающем трубопроводе;  $[\Delta h]_к$  - допустимый кавитационный



запас:

$$[\Delta h]_к \approx \Delta h_к^{кр} \cdot 1,25 \quad (39)$$

где  $\Delta h_к^{кр}$  - критический кавитационный запас, определяется по формуле С.С.Руднева,

$$\Delta h_к^{кр} = 10(n\sqrt{Q}/C)^{4/3} \quad (40)$$

где  $C$  - кавитационный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей насоса, принять  $C=1000$ .

### 3. ПРИМЕР РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Исходные данные для расчета сведены в таблице 2.

Таблица 2.

Исходные данные

Участковые расходы, л/с					Длины участков, м					
$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$l_{0-1}$	$l_{1-2}$	$l_{2-3}$	$l_{3-4}$	$l_{4-5}$	$l_{2-6}$
15	23	17	25	20	30	3100	2200	1000	3500	4100

Продолжение таблицы 2.

Геодезические отметки, м					Коэффициенты местных сопротивлений					
$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$\zeta_{0-1}$	$\zeta_{1-2}$	$\zeta_{2-3}$	$\zeta_{3-4}$	$\zeta_{4-5}$	$\zeta_{2-6}$
35	37	33	50	45	15	20	18	14	21	13

Частота вращения насоса:  $n = 900$  об/мин

КПД насоса:  $\eta = 0,7$

Температура воды:  $\theta = 20$  °С

Заданный напор:  $h_{\text{зад}} = 10$  м

Тип труб: чугунная новая трубы

#### **Выбор магистрали**

В магистраль должны входить последовательно соединенные участки, наиболее нагруженные по расходу и имеющие наибольшую протяженность. Участки 0-1 и 1-2 входят в магистраль, далее необходимо сравнить два направления 2-3-4-5 и 2-6:

Первое направление 2-3-4-5:

$$\sum l_{2-3-4-5} = l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} = 6700$$

$$\sum Q_{2-3-4-5} = Q_3 + Q_4 + Q_5 = 0,065$$

Второе направление 2-6:

$$\sum l_{2-6} = l_{2-6} = 4100$$

$$\sum Q_{2-6} = Q_6 = 20 = 0,02$$

Так как  $\sum l_{2-3-4-5} > \sum l_{2-6}$ ;  $\sum Q_{2-3-4-5} > \sum Q_{2-6}$ , то участок 2-3-4-5 является магистралью, а участок 2-6 является ветвью.

### ***Определение транзитных расходов***

Транзитные расходы определяются для всех участков трубопровода:

- для участка 4-5 транзитный расход:  $Q_{4-5} = Q_5 = 25$  л/с;

- для участка 3-4 транзитный расход:  $Q_{3-4} = Q_4 + Q_5 = 42$  л/с;

- для участка 2-3 транзитный расход:  $Q_{2-3} = Q_3 + Q_4 + Q_5 = 65$  л/с;

- для участка 2-6 транзитный расход:  $Q_{2-6} = Q_6 = 20$  л/с;

- для участков 1-2 и 0-1 транзитный расход будет одинаковый:

$$Q_{1-2} \approx Q_{0-1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = 100 \text{ л/с.}$$

### ***Расчет магистрального трубопровода***

Расчет напорного трубопровода начинается с магистрали, причем с последнего участка (наиболее удаленного от насоса), и далее против направления потока к первому участку.

#### **Расчет участка 4-5.**

Предварительный диаметр трубопровода:

$$d'_{4-5} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q_{4-5}}{v_{\text{пр}}}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,025}{1,0}} = 0,179 \text{ м}$$

где  $Q_{4-5} = 0,025$ , м<sup>3</sup>/с- расход на участке 4-5;  $v_{\text{пр}} = 1,0$ , м/с - ориентировочная скорость в трубе, для расходов  $Q = 6 - 50$ , л/с.

По табл. 1 выбирается ближайшее к  $d'_{4-5}$  значение диаметра трубы  $d_{4-5}$ , после чего, для выбранной чугунной трубы новой, можно выписать значение расходной характеристики, а так же величину шероховатости:  $d_{4-5} = 200$  мм,  $K'_{4-5} = 444,3$  л/с,  $\Delta_3 = 0,2$  мм.

Фактическая скорость течения в трубе выбранного диаметра:

$$v_{4-5} = \frac{4 \cdot Q_{4-5}}{\pi \cdot d_{4-5}^2} = \frac{4 \cdot 0,025}{\pi \cdot 0,2^2} = 0,8 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса:

$$Re_{4-5} = \frac{v_{4-5} \cdot d_{4-5}}{\nu} = \frac{0,8 \cdot 0,2}{0,01006 \cdot 10^{-4}} = 159045$$

где  $\nu = 0,01006 \cdot 10^{-4}$  - кинематический коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с, при  $\Theta = 20$  °С (приложение 1)

По числу Рейнольдса определяется зона сопротивления трубопровода:

1. Область чисел Рейнольдса в диапазоне  $0 < Re \leq 2320$  соответствует ламинарному режиму (первая зона);

2. Область  $2320 < Re \leq \frac{10 \cdot d}{\Delta_3}$  соответствует зоне гидравлически гладких труб (вторая зона);

3. Область  $\frac{10 \cdot d}{\Delta_3} < Re \leq \frac{500 \cdot d}{\Delta_3}$  соответствует зоне гидравлически шероховатых труб (третья зона);

4. Область  $Re \geq \frac{500 \cdot d}{\Delta_3}$  соответствует квадратичной зоне (четвертая зона).

Для рассчитываемого участка трубопровода будет наблюдаться III зона сопротивления, т.к. выполняется условие:

$$\frac{10 \cdot d_{4-5}}{\Delta_3} < \text{Re}_{4-5} \leq \frac{500 \cdot d_{4-5}}{\Delta_3} \Rightarrow 10^4 < 159045 < 5 \cdot 10^5$$

Расходный коэффициент  $K'_{4-5} = 444,3 \text{ л/с}$ , выбранный ранее, соответствует IV зоне сопротивления, поэтому необходимо внести поправочный коэффициент  $m$  и скорректировать значение расходной характеристики:

$$m = 1 + \frac{68 \cdot d_{4-5}}{\text{Re}_{4-5} \cdot \Delta_3} = 1 + \frac{68 \cdot 0,2}{159045 \cdot 0,0002} = 1,43$$

$$K_{4-5} = K'_{4-5} \cdot m^{-0,125} = 444,3 \cdot 1,43^{-0,125} = 424 \text{ л/с}$$

Эквивалентная длина трубопровода на участке 4-5:

$$l_{\text{Э}4-5} = 0,082 \cdot \frac{\sum \zeta_{4-5} \cdot K_{4-5}^2}{d_{4-5}^4} = 0,082 \cdot \frac{21 \cdot 0,424^2}{0,2^4} = 193,5 \text{ м}$$

Потери напора на участке 4-5:

$$\Delta h_{4-5} = \frac{l_{4-5} + l_{\text{Э}4-5}}{K_{4-5}^2} \cdot Q_{4-5}^2 = \frac{3500 + 193,5}{424^2} \cdot 25^2 = 12,8 \text{ м}$$

где  $l_{4-5} = 3500$  - длина участка 4-5, м.

Полный гидростатический напор в конце участка 4-5 (точка 5):

$$H_5 = z_5 + h_{\text{зад}} = 50 + 10 = 60 \text{ м}$$

где  $h_{\text{зад}} = 10$  - заданный напор, м,  $z_5 = 50$  - геодезическая отметка, м;

Полный напор в начале участка 4-5 (точка 4):

$$H_4 = H_5 + \Delta h_{4-5} = 60 + 12,8 = 72,8 \text{ м}$$

Рабочий напор в начале участка 4-5 (точка 4):

$$h_{p4} = H_4 - z_4 = 72,8 - 33 = 39,8 \text{ м}$$

Значение рабочего напора удовлетворяет заданию:

$$39,8 > 10 \Rightarrow h_{p4} \geq h_{\text{зад}}$$

После проверки рабочих напоров в указанных точках можно приступать к построению пьезометрической линии (ПЛ) на участке 4-5 (Приложение 4)

Расчет участка 3-4

Предварительный диаметр трубопровода:

$$d'_{3-4} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q_{3-4}}{v_{\text{пр}}}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,042}{1,0}} = 0,23 \text{ м}$$

где  $Q_{3-4} = 0,042$  - расход на участке 3-4, м<sup>3</sup>/с;  $v_{\text{пр}} = 1,0$  м/с, ориентировочная скорость в трубе, для расходов  $Q = 6 - 50$  л/с.

По табл. 1 выбирается ближайшее к  $d'_{3-4}$  значение диаметра трубы:  $d_{3-4} = 250$  мм,  $K'_{3-4} = 798,8$  л/с,  $\Delta_9 = 0,2$  мм.

Фактическая скорость течения в трубе выбранного диаметра:

$$v_{3-4} = \frac{4 \cdot Q_{3-4}}{\pi \cdot d_{3-4}^2} = \frac{4 \cdot 0,042}{\pi \cdot 0,25^2} = 0,86 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{3-4} = \frac{v_{3-4} \cdot d_{3-4}}{\nu} = \frac{0,86 \cdot 0,25}{0,01006 \cdot 10^{-4}} = 213717.$$

Для рассчитываемого участка трубопровода будет наблюдаться III зона сопротивления, т.к. выполняется условие:

$$12500 < 213717 < 6,25 \cdot 10^5 \Rightarrow \frac{10 \cdot d_{3-4}}{\Delta_9} < \text{Re}_{3-4} \leq \frac{500 \cdot d_{3-4}}{\Delta_9}$$

Расходный коэффициент  $K'_{3-4} = 798,8$  л/с, выбранный ранее, соответствует IV зоне сопротивления, поэтому необходимо внести поправочный коэффициент  $m$  и скорректировать значение расходной характеристики:

$$m = 1 + \frac{68 \cdot d_{3-4}}{\text{Re}_{3-4} \cdot \Delta_9} = 1 + \frac{68 \cdot 0,25}{213717 \cdot 0,0002} = 1,4$$

$$K_{3-4} = 798,8 \cdot 1,4^{-0,125} = 766 \text{ л/с}$$

Эквивалентная длина трубопровода на участке 3-4:

$$l_{\text{Э}3-4} = 0,082 \cdot \frac{\sum \zeta_{3-4} \cdot K_{3-4}^2}{d_{3-4}^4} = 0,082 \cdot \frac{14 \cdot 0,766^2}{0,25^4} = 172,5 \text{ м}$$

Потери напора на участке 3-4:

$$\Delta h_{3-4} = \frac{l_{3-4} + l_{\text{Э}3-4}}{K_{3-4}^2} \cdot Q_{3-4}^2 = \frac{1000 + 172,5}{766^2} \cdot 42^2 = 3,5 \text{ м}$$

где  $l_{3-4} = 1000$ , м - длина участка 3-4.

Полный гидростатический напор в начале участка 3-4 (точка 3):

$$H_3 = H_4 + \Delta h_{3-4} = 72,8 + 3,5 = 76,3 \text{ м}$$

Рабочий напор в начале участка 3-4 (точка 3):

$$h_{p3} = H_3 - z_3 = 76,3 - 37 = 39,3 \text{ м}$$

значение рабочего напора удовлетворяет заданию:  $39,3 > 10$ , т.е.

$$h_{p3} \geq h_{\text{зад}}.$$

После проверки рабочих напоров в указанных точках можно приступить к построению пьезометрической линии (ПЛ) на участке 3-4 (Приложение 4).

#### Расчет участка 2-3

Предварительный диаметр трубопровода:

$$d'_{2-3} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q_{2-3}}{v_{\text{пр}}}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,065}{1,0}} = 0,29 \text{ м}$$

где  $Q_{2-3} = 0,065$  – расход на участке 2-3, м<sup>3</sup>/с;  $v_{\text{пр}} = 1,0$  - ориентировочная скорость в трубе, м/с, для расходов  $Q = 50 - 120$  л/с.

По табл. 1 выбирается ближайшее к  $d'_{2-3}$  значение диаметра трубы:  $d_{2-3} = 300$  мм;  $K'_{2-3} = 1288$  л/с,  $\Delta_3 = 0,2$  мм.

Фактическая скорость течения в трубе выбранного диаметра:

$$v_{2-3} = \frac{4 \cdot Q_{2-3}}{\pi \cdot d_{2-3}^2} = \frac{4 \cdot 0,065}{\pi \cdot 0,3^2} = 0,92 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{2-3} = \frac{v_{2-3} \cdot d_{2-3}}{\nu} = \frac{0,92 \cdot 0,3}{0,01006 \cdot 10^{-4}} = 274353.$$

Для рассчитываемого участка трубопровода будет наблюдаться III зона сопротивления, т.к. выполняется условие:

$$\frac{10 \cdot d_{2-3}}{\Delta_3} < \text{Re}_{2-3} \leq \frac{500 \cdot d_{2-3}}{\Delta_3} \Rightarrow 15000 < 274353 < 7,5 \cdot 10^5$$

Расходный коэффициент  $K'_{2-3} = 1288$ , л/с, выбранный ранее, соответствует IV зоне сопротивления, поэтому необходимо внести поправочный коэффициент  $m$  и скорректировать значение расходной характеристики:

$$m = 1 + \frac{68 \cdot d_{2-3}}{\text{Re}_{2-3} \cdot \Delta_3} = 1 + \frac{68 \cdot 0,3}{274353 \cdot 0,0002} = 1,37$$

$$K_{2-3} = 1288 \cdot 1,37^{-0,125} = 1238 \text{ л/с}$$

Эквивалентная длина трубопровода на участке 2-3:



$$l_{\text{э}2-3} = 0,082 \cdot \frac{\sum \zeta_{2-3} \cdot K_{2-3}^2}{d_{2-3}^4} = 0,082 \cdot \frac{18 \cdot 1,238^2}{0,3^4} = 280 \text{ м}$$

Потери напора на участке 2-3:

$$\Delta h_{2-3} = \frac{l_{2-3} + l_{\text{э}2-3}}{K_{2-3}^2} \cdot Q_{2-3}^2 = \frac{2200 + 280}{1238^2} \cdot 65^2 = 6,8 \text{ м}$$

где  $l_{2-3} = 2200$  - длина участка 2-3, м.

Полный гидростатический напор в начале участка 2-3 (точка 2):

$$H_2 = H_3 + \Delta h_{2-3} = 76,3 + 6,8 = 83,1 \text{ м}$$

Рабочий напор в начале участка - точка 2 (Приложение 2):

$$h_{p2} = H_2 - z_2 = 83,1 - 35 = 48,1 \text{ м}$$

Значение рабочего напора удовлетворяет заданию:

$$h_{p2} \geq h_{\text{зад}}, \quad 48,1 \geq 10$$

После проверки рабочих напоров в указанных точках можно приступить к построению пьезометрической линии (ПЛ) на участке 2-3 (Приложение 4).

### ***Расчет ветви трубопровода***

#### Расчет участка 2-6

Предварительный полный гидростатический напор в конце участка 2-6 (точка 6):

$$H'_6 = z_6 + h_{\text{зад}} = 45 + 10 = 55$$

где  $z_6 = 45$  - геодезическая отметка точки 6, м.

Допустимые потери напора на участке 2-6:

$$[\Delta h_{2-6}] = H_2 - H'_6 = 83,1 - 55 = 28,1 \text{ м}$$

где  $H_2 = 83,1$  - полный гидростатический напор в начале участка 2-6 (точка 2), м.

Предварительное значение модуля расхода:

$$K''_{2-6} = Q_{2-6} \cdot \sqrt{\frac{l_{2-6}}{[\Delta h_{2-6}]}} = 20 \cdot \sqrt{\frac{4100}{28,1}} = 241,5 \text{ л/с}$$

где  $l_{2-6} = 4100$  - длина участка 2-6, м.

По табл. 1 находится ближайшее **большее** к  $K''_{2-6}$  значению модуля расхода для заданного типа труб (новые чугунные трубы):  $K'_{2-6} = 444,3$  л/с,  $d_{2-6} = 200$  мм.

Фактическую скорость воды:

$$v_{2-6} = \frac{4 \cdot Q_{2-6}}{\pi \cdot d_{2-6}^2} = \frac{4 \cdot 0,02}{3,14 \cdot 0,2^2} = 0,64 \text{ м/с}$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{2-6} = \frac{v_{2-6} \cdot d_{2-6}}{\nu} = \frac{0,64 \cdot 0,2}{0,01006 \cdot 10^{-4}} = 127236$$

Для рассчитываемого участка трубопровода будет наблюдаться III зона сопротивления, т.к. выполняется условие:

$$\frac{10 \cdot d_{2-6}}{\Delta_3} < Re_{2-6} \leq \frac{500 \cdot d_{2-6}}{\Delta_3} \Rightarrow 10000 < 127236 < 5 \cdot 10^5$$

Расходный коэффициент  $K'_{2-6} = 444,3$  л/с, выбранный ранее, соответствует IV зоне сопротивления, поэтому необходимо внести поправочный коэффициент  $m$  и скорректировать значение расходной характеристики:

$$m = 1 + \frac{68 \cdot d_{2-6}}{Re_{2-6} \cdot \Delta_3} = 1 + \frac{68 \cdot 0,2}{127236 \cdot 0,0002} = 1,5$$

$$K_{2-6} = 444,3 \cdot 1,5^{-0,125} = 422,3 \text{ л/с}$$

Эквивалентная длина трубопровода на участке 2-6:

$$l_{\text{Э}2-6} = 0,082 \cdot \frac{\sum \zeta_{2-6} \cdot K_{2-6}^2}{d_{2-6}^4} = 0,082 \cdot \frac{13 \cdot 0,422^2}{0,2^4} = 119 \text{ м}$$

Потери напора на участке 2-6:

$$\Delta h_{2-6} = \frac{l_{2-6} + l_{\text{Э}2-6}}{K_{2-6}^2} \cdot Q_{2-6}^2 = \frac{4100 + 119}{422,3^2} \cdot 20^2 = 9,5 \text{ м}$$

где  $l_{2-6} = 4100$  - длина участка 2-6, м.

Проверка по допустимым потерям напора на участке:

$$9,5 < 28,1 \Rightarrow \Delta h_{2-6} < [\Delta h_{2-6}]$$

Полный гидростатический напор в конце участка 2-6 (точка 6):

$$H_6 = H_2 - \Delta h_{2-6} = 83,1 - 9,5 = 73,6 \text{ м}$$

Рабочий напор в конце участка 2-6 (точка 6):

$$h_{p6} = H_6 - z_6 = 73,6 - 45 = 28,6 \text{ м}$$

Значение рабочего напора удовлетворяет заданию:

$$28,6 \geq 10 \Rightarrow h_{p6} \geq h_{\text{зад}}$$

После проверки рабочих напоров в указанных точках можно приступить к построению пьезометрической линии (ПЛ) на участке 2-6 (Приложение 4).

### ***Продолжение расчета магистрального трубопровода***

Расчет участка 1-2:

Предварительный диаметр трубопровода:

$$d'_{2-3} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q_{1-2}}{v_{np}}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,1}{1,2}} = 0,326 \text{ м}$$

где  $Q_{2-6} = 0,1$  - расход на участке 1-2, м<sup>3</sup>/с;  $v_{np} = 1,2$  - ориентировочная скорость в трубе, м/с, для расходов  $Q = 50-120$  л/с.

По табл. 1 выбирается ближайшее к  $d'_{1-2}$  значение диаметра трубы:  $d_{1-2} = 350$ , мм;  $K'_{2-3} = 1933$  л/с,  $\Delta_3 = 0,2$  мм.

Фактическая скорость течения в трубе выбранного диаметра:

$$v_{1-2} = \frac{4 \cdot Q_{1-2}}{\pi \cdot d_{1-2}^2} = \frac{4 \cdot 0,1}{\pi \cdot 0,35^2} = 1,0 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса:

$$Re_{1-2} = \frac{v_{1-2} \cdot d_{1-2}}{\nu} = \frac{1,0 \cdot 0,35}{0,01006 \cdot 10^{-4}} = 347912$$

Для рассчитываемого участка трубопровода будет наблюдаться III зона сопротивления, т.к. выполняется условие:

$$17500 < 347912 < 8,75 \cdot 10^5 \Rightarrow \frac{10 \cdot d_{1-2}}{\Delta_3} < Re_{1-2} \leq \frac{500 \cdot d_{1-2}}{\Delta_3}$$

Расходный коэффициент  $K'_{1-2} = 1933$ , выбранный ранее, соответствует IV зоне сопротивления, поэтому необходимо внести поправочный коэффициент  $m$  и скорректировать значение расходной характеристики:

$$m = 1 + \frac{68 \cdot d_{1-2}}{Re_{1-2} \cdot \Delta_3} = 1 + \frac{68 \cdot 0,35}{347912 \cdot 0,0002} = 1,34$$

$$K_{1-2} = 1933 \cdot 1,34^{-0,125} = 1863 \text{ л/с}$$

Эквивалентная длина трубопровода на участке 1-2:

$$l_{\Theta 1-2} = 0,082 \cdot \frac{\sum \zeta_{1-2} \cdot K_{1-2}^2}{d_{1-2}^4} = 0,082 \cdot \frac{20 \cdot 1,863^2}{0,35^4} = 380 \text{ м}$$

Потери напора на участке 1-2:

$$\Delta h_{1-2} = \frac{l_{1-2} + l_{\Theta 1-2}}{K_{1-2}^2} \cdot Q_{1-2}^2 = \frac{3100 + 380}{1863^2} \cdot 100^2 = 10 \text{ м}$$

где  $l_{1-2} = 3100$  - длина участка 1-2, м.

Полный гидростатический напор в начале участка 1-2 (точка 1):

$$H_1 = H_2 + \Delta h_{1-2} = 83,1 + 10 = 93,1 \text{ м}$$

Можно приступить к построению пьезометрической линии (ПЛ) на участке 1-2 (приложение 4).

### ***Определение приводной мощности насоса***

Мощность насоса определяется по формуле (36), причем для ее определения необходимо рассчитать напор насоса  $H_n$  по формуле (37). Для определения напора насоса необходимо рассчитать предельную высоту установки насоса по условию безкавитационной работы (формула 38):

$$Z_n = \frac{p_a - p_{\text{нп}}}{\rho \cdot g} - \Delta h_{l_{0-1}} - \Delta h_{M_{0-1}} - [\Delta h]_K$$

где  $p_a = 101325$  - атмосферное давление, Па;  $p_{\text{нп}} = 2314$  - давление насыщенных паров воды при  $\Theta = 20^\circ\text{C}$ , Па;  $\Delta h_{l_{0-1}}$  - потери напора по длине всасывающего трубопровода:

$$\Delta h_{l_{0-1}} = \frac{Q_{0-1}^2}{K_{0-1}^2} \cdot l_{0-1} = 0,08 \text{ м}$$

Так как расход через участок 0-1 равен расходу через участок 1-2, то значение диаметра, скорости и числа Рейнольдса будут соот-

ветственно:  $d_{1-2} = 350$  мм,  $K_{0-1} = 1863$  л/с,  $\Delta_{\text{с}} = 0,2$  мм,  $Re = 347912$   
 $l_{0-1} = 30$  м,  $v_{0-1} = 1$  м/с.

Определение местных потерь напора на всасывающей линии:

$$\Delta h_{m_{0-1}} = \sum \xi_{0-1} \frac{v_{0-1}^2}{2g} = 15 \cdot \frac{1}{2 \cdot 9,8} = 0,76 \text{ м}$$

где  $\xi_m = 15$  - суммарный коэффициент местных сопротивлений во всасывающей линии (участок 0-1).

Определение допустимого кавитационного запаса:

$$[\Delta h]_K \approx \Delta h_k^{kp} \cdot 1,25 = 1,87 \cdot 1,25 = 2,34$$

где  $\Delta h_k^{kp}$  - критический кавитационный запас:

$$\Delta h_k^{kp} = 10 \cdot \left( n \cdot \frac{\sqrt{Q_{0-1}}}{C} \right)^{\frac{4}{3}} = 10 \cdot \left( 900 \cdot \frac{\sqrt{0,1}}{1000} \right)^{\frac{4}{3}} = 1,87 \text{ м}$$

где  $C$  – кавитационный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей насоса, принят  $C = 1000$ ;  $n = 900$  об/мин – частота вращения насоса.

Предельно допустимая высота всасывания насоса:

$$Z_H = \frac{101350 - 2314}{1000 \cdot 9,8} - 0,08 - 0,76 - 2,34 = 6,92 \text{ м}$$

Напор насоса:

$$H_H = 93,1 + 6,92 + \frac{100^2}{1863^2} \cdot 30 + 16 \cdot \frac{1^2}{2 \cdot 9,8} = 101 \text{ м}$$

Мощность насоса:

$$N_{\text{дБ}} = \frac{\rho g H_{\text{н}} Q_{1-2}}{\eta_{\text{н}} \cdot 1000} = \frac{1000 \cdot 9,8 \cdot 101 \cdot 0,1}{0,7 \cdot 1000} = 141,4 \text{ кВт}$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маховиков Б.С., Медведков В.И., Шорников В.В. Сборник задач по гидроприводу и гидромеханике: Учебное пособие / Б.С. Маховиков. – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт (технический университет), 2004. – 153с.
2. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа: Учебник для вузов / А.Д. Гиргидов. – СПб.: СПбГПУ, 2002. - 545с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 560с.
4. Угинчус А.А. Гидравлика и гидравлические машины: учебник / А.А. Угинчус. – М.: Аз-book, 2009. – 395с.
5. Кошман В.С., Машкарева И.П. Гидравлика: сборник задач с примерами решений / В.С. Кошман. – Пермь: Пермская ГСХА, 2013. – 152с.
6. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справочное пособие / Ф.А. Шевелев. – М.: Стройиздат, 1984. – 117с.
7. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод: Учебник для вузов / В.Г. Гейер. – М.: Недра, 1991. – 331с.



ПРИЛОЖЕНИЕ 1

$\Theta, ^\circ C$	$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	$\Theta, ^\circ C$	$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	$\Theta, ^\circ C$	$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	$\Theta, ^\circ C$	$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$
1	0,0173	11	0,0127	21	0,0098	31	0,00873
2	0,0167	12	0,0124	22	0,0096	32	0,00767
3	0,0162	13	0,0121	23	0,0094	33	0,00751
4	0,0157	14	0,0117	24	0,0092	34	0,00736
5	0,0152	15	0,0114	25	0,0089	35	0,00721
6	0,0147	16	0,0112	26	0,0087	36	0,00706
7	0,0143	17	0,0109	27	0,0086	37	0,00693
8	0,0139	18	0,0106	28	0,0084	38	0,00679
9	0,0135	19	0,0103	29	0,0082	39	0,00666
10	0,0131	20	0,0101	30	0,0080	40	0,00654

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Номер варианта	Участковые расходы, л/с						Длины участков, м						Геодезические отметки, м					
	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$		$I_{01}$	$I_{02}$	$I_{03}$	$I_{04}$	$I_{05}$	$I_{06}$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	
1	15	23	17	25	20		30	3100	2200	1000	3500	4100	35	37	33	50	45	
2	19	14	20	16	25		35	3000	2300	1100	3400	4200	47	35	50	33	60	
3	20	19	15	27	21		40	2900	2400	1200	3300	4300	40	37	45	30	55	
4	16	20	19	25	18		45	2800	2100	1300	3200	4400	44	40	56	33	65	
5	13	16	21	27	19		50	2700	2200	1400	3100	4500	39	47	57	50	70	
6	21	13	23	25	21		55	2600	2000	1500	3500	4600	43	39	59	45	68	
7	27	21	13	19	24		50	2500	2800	1600	3400	4700	42	35	62	56	66	
8	12	27	21	13	25		45	2400	2900	1700	3300	4800	37	40	65	57	67	
9	18	12	27	21	23		40	2300	3000	2800	3200	4900	39	33	66	59	41	
10	16	18	12	27	23		35	2200	3100	1900	3500	5000	40	35	67	62	55	
11	25	16	18	23	27		30	2100	3200	2600	3400	4900	43	41	68	65	33	
12	23	25	16	18	22		55	2000	3300	2500	1700	4800	45	50	70	66	35	
13	19	23	25	16	27		50	2100	3200	2600	1600	4700	40	47	68	61	39	
14	17	19	29	21	13		45	2200	3100	2700	1500	4600	37	55	67	60	44	
15	21	17	19	29	23		40	2300	3000	2800	1400	4500	35	50	65	39	46	
16	15	21	18	25	19		35	2400	2900	3500	1300	4400	33	54	63	42	39	
17	27	15	19	21	12		30	2500	2800	3400	1200	4300	30	55	61	44	70	
18	25	27	15	19	21		35	2600	2700	3300	1100	4200	35	47	60	55	70	
19	18	25	23	15	29		40	2700	2600	3200	1700	4100	39	46	63	51	68	
20	17	18	25	23	15		45	2800	2500	3100	1800	4000	42	49	61	57	66	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Номер вариан- та	Участковые расходы, л/с						Длины участков, м						Геодезические отметки, м					
	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$		$I_{01}$	$I_{02}$	$I_{03}$	$I_{04}$	$I_{05}$	$I_{06}$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	
1	15	23	17	25	20	30	3100	2200	1000	3500	4100	35	37	33	50	45		
2	19	14	20	16	25	35	3000	2300	1100	3400	4200	47	35	50	33	60		
3	20	19	15	27	21	40	2900	2400	1200	3300	4300	40	37	45	30	55		
4	16	20	19	25	18	45	2800	2100	1300	3200	4400	44	40	56	33	65		
5	13	16	21	27	19	50	2700	2200	1400	3100	4500	39	47	57	50	70		
6	21	13	23	25	21	55	2600	2000	1500	3500	4600	43	39	59	45	68		
7	27	21	13	19	24	50	2500	2800	1600	3400	4700	42	35	62	56	66		
8	12	27	21	13	25	45	2400	2900	1700	3300	4800	37	40	65	57	67		
9	18	12	27	21	23	40	2300	3000	2800	3200	4900	39	33	66	59	41		
10	16	18	12	27	23	35	2200	3100	1900	3500	5000	40	35	67	62	55		
11	25	16	18	23	27	30	2100	3200	2600	3400	4900	43	41	68	65	33		
12	23	25	16	18	22	55	2000	3300	2500	1700	4800	45	50	70	66	35		
13	19	23	25	16	27	50	2100	3200	2600	1600	4700	40	47	68	61	39		
14	17	19	29	21	13	45	2200	3100	2700	1500	4600	37	55	67	60	44		
15	21	17	19	29	23	40	2300	3000	2800	1400	4500	35	50	65	39	46		
16	15	21	18	25	19	35	2400	2900	3500	1300	4400	33	54	63	42	39		
17	27	15	19	21	12	30	2500	2800	3400	1200	4300	30	55	61	44	70		
18	25	27	15	19	21	35	2600	2700	3300	1100	4200	35	47	60	55	70		
19	18	25	23	15	29	40	2700	2600	3200	1700	4100	39	46	63	51	68		
20	17	18	25	23	15	45	2800	2500	3100	1800	4000	42	49	61	57	66		

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 2

Номер варианта	Коэффициенты местных сопротивлений						Частота вращения насоса	КПД насоса
	$\zeta_{0-1}$	$\zeta_{1-2}$	$\zeta_{2-3}$	$\zeta_{3-4}$	$\zeta_{4-5}$	$\zeta_{2-6}$		
1	15	7	8	6	10	12	900	0,7
2	17	12	9	7	11	13	900	0,69
3	19	15	10	8	12	14	900	0,68
4	18	4	12	9	13	15	900	0,66
5	16	8	14	10	14	14	900	0,65
6	20	14	16	11	15	13	1000	0,66
7	21	13	18	12	16	12	1000	0,67
8	22	10	20	13	17	11	1000	0,68
9	19	6	21	14	18	10	1000	0,69
10	17	11	7	15	19	16	1000	0,70
11	15	9	8	6	20	17	1100	0,65
12	16	14	9	7	22	18	1100	0,66
13	19	5	14	8	27	19	1100	0,67
14	20	16	5	9	5	20	1100	0,68
15	21	11	16	10	7	21	1100	0,69
16	22	12	13	11	9	22	1200	0,7
17	21	14	9	12	11	23	1200	0,71
18	20	4	11	13	13	25	1200	0,72
19	19	7	10	14	15	10	1200	0,73
20	18	8	17	15	17	11	1200	0,74

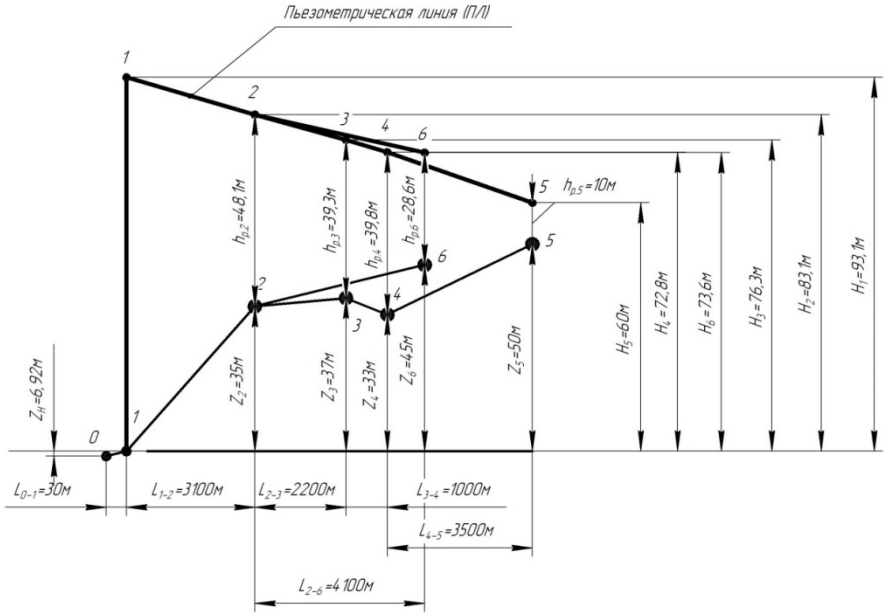
ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 2

Номер варианта	Коэффициенты местных сопротивлений						Частота вращения насоса	КПД насоса
	$\zeta_{0-1}$	$\zeta_{1-2}$	$\zeta_{2-3}$	$\zeta_{3-4}$	$\zeta_{4-5}$	$\zeta_{2-6}$		
1	15	7	8	6	10	12	900	0,7
2	17	12	9	7	11	13	900	0,69
3	19	15	10	8	12	14	900	0,68
4	18	4	12	9	13	15	900	0,66
5	16	8	14	10	14	14	900	0,65
6	20	14	16	11	15	13	1000	0,66
7	21	13	18	12	16	12	1000	0,67
8	22	10	20	13	17	11	1000	0,68
9	19	6	21	14	18	10	1000	0,69
10	17	11	7	15	19	16	1000	0,70
11	15	9	8	6	20	17	1100	0,65
12	16	14	9	7	22	18	1100	0,66
13	19	5	14	8	27	19	1100	0,67
14	20	16	5	9	5	20	1100	0,68
15	21	11	16	10	7	21	1100	0,69
16	22	12	13	11	9	22	1200	0,7
17	21	14	9	12	11	23	1200	0,71
18	20	4	11	13	13	25	1200	0,72
19	19	7	10	14	15	10	1200	0,73
20	18	8	17	15	17	11	1200	0,74

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Номер варианта	Участковые расходы, л/с				Длины участков, м				Геодезические отметки, м					Коэффициенты местных сопротивлений				
	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$I_{1-2}$	$I_{2-3}$	$I_{3-4}$	$I_{4-5}$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$\zeta_{1-2}$	$\zeta_{2-3}$	$\zeta_{3-4}$	$\zeta_{4-5}$		
1	23	15	25	15	4100	1000	3200	2500	45	53	73	40	10	7	9	19		
2	14	17	16	26	4000	1100	3300	2400	37	65	60	33	11	12	14	20		
3	19	22	27	17	3900	1200	3200	4300	30	50	45	41	12	15	5	22		
4	20	21	25	15	1800	1300	3100	2200	34	67	56	35	13	4	16	27		
5	16	15	27	17	3700	1400	3000	2100	49	45	57	43	14	8	11	5		
6	13	14	25	15	2900	1500	2900	4500	33	33	59	27	15	14	12	7		
7	21	18	19	29	2100	1600	2800	4400	52	70	72	33	16	13	14	9		
8	27	19	13	23	3400	1700	2700	1300	47	45	65	57	17	10	4	11		
9	12	30	21	11	2700	2800	2600	2200	49	69	66	59	18	6	7	13		
10	18	25	27	17	3200	1900	2500	1500	30	32	64	62	19	11	8	15		
11	16	24	23	23	2800	3200	2600	4400	53	41	68	43	12	8	8	17		
12	25	16	18	18	2400	3300	2500	2700	35	50	70	66	13	9	9	15		
13	23	14	16	16	3100	3200	2600	3600	50	47	68	61	14	10	14	16		
14	19	23	21	21	2200	3100	2700	1500	27	55	67	60	15	12	5	19		
15	17	24	29	29	2300	3000	2800	1400	45	50	65	39	14	14	16	20		
16	21	27	25	25	2600	2900	3500	1800	33	54	63	42	13	16	13	21		
17	15	28	21	21	3500	2800	3400	2100	30	55	61	44	12	18	9	22		
18	27	15	19	29	2900	2700	3300	3100	45	47	70	55	11	20	11	21		
19	25	17	15	25	2700	2600	3200	1700	39	46	63	51	10	21	10	20		
20	18	19	23	17	4800	2500	3100	1200	32	49	69	57	16	7	17	19		

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Гидравлический расчет напорных трубопроводов .....	4
2. Гидравлический расчет распределительной сети .....	11
3. Пример расчет распределительной сети.....	18
Библиографический список .....	32
Приложения .....	33



## **ГИДРОМЕХАНИКА**

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности 21.05.04*

Сост.: *С.Л. Сержан, М.А. Васильева*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
горных транспортных машин

Ответственный за выпуск *С.Л. Сержан*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 22.01.2020. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 2,2. Усл.кр.-отг. 2,2. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 100 экз. Заказ 21. С 5.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2