

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В разделе рассматриваются длинные трубопроводы, последовательное и параллельное соединение простых трубопроводов, трубопроводы с путевой раздачей и распределительные сети (применительно к расчетно-графической работе).

В *длинных* трубопроводах влияние местных потерь энергии Δh или Δp_m (см. раздел 3) невелико. Эти потери, как правило, учитывают, увеличив потери энергии по длине Δh_l (или Δp_l) на 10 %.

Потери энергии по длине определяются по формуле Дарси:

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \text{или} \quad \Delta p_l = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (5.1)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); l – приведенная длина расчетного участка трубы, м; v – средняя скорость потока, м/с; d – диаметр трубы, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Формулу (5.1) можно привести к таким выражениям:

$$\Delta h_l = \frac{Q^2}{K^2} l = il; \quad (5.2)$$

$$\Delta h_l = A l Q^2; \quad (5.3)$$

$$\Delta h_l = a Q^2, \quad (5.4)$$

где Q – объемный расход, м³/с; A – удельное сопротивление трубопровода, с²/м⁶; K – расходная характеристика, м³/с; a – полное сопротивление трубопровода, с²/м⁵; i – гидравлический уклон;

$$A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} = \frac{1}{K^2}; \quad (5.5)$$

$$K = \sqrt{\frac{g\pi^2 d^5}{8\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{A}}; \quad (5.6)$$

$$a = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} l = \frac{l}{K^2}. \quad (5.7)$$

Для длинных трубопроводов можно пренебречь кинетической составляющей уравнения Бернулли (3.12), так как $v^2/2g \ll \Delta h_l$. Тогда *разность пьезометрических высот* в рассматриваемых сечениях трубопровода будет примерно равна потерям энергии Δh_l , т.е.

$$\Delta H = \Delta h_l = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right). \quad (5.8)$$

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 Δ_s .

В **табл. 5.1** 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); коэффициент Дарси λ при этом определяется формулой (3.21).

Таблица 5.1

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
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 Δ_3 трубы по следующей ориентировочной цепочке соотношений (см. раздел 3):

$$0 \dots I \dots 2320 \dots II \dots 10 d / \Delta_3 \dots III \dots 500 d / \Delta_3 \dots IV \quad (5.9)$$

Область $0 < Re \leq 2320$ соответствует ламинарному режиму (первая зона). Потери энергии

$$\Delta h_l = 32 \frac{l \nu v}{g d^2} = \frac{128 \nu}{g \pi d^4} l Q = K_1 l Q, \quad (5.10)$$

где ν – кинематическая вязкость, m^2/c ; v – средняя скорость потока, m/c ; l – длина рассматриваемого участка трубопровода, m ; Q – объемный расход, m^3/c ; $K_1 = 128 \nu / g \pi d^4$ – постоянная для ламинарного режима, c/m^3 .

Область II соответствует зоне гидравлически гладких труб; область III – зоне гидравлически шероховатых труб; область IV – квадратичная.

В общем случае для турбулентного движения рекомендуется формула А.Д.Альтшуля:

$$\lambda = 0,11(68/Re + \Delta_3/d)^{0,25}.$$

Убедившись на основании анализа цепочки (5.9), что рассматриваемый трубопровод работает не в квадратичной зоне, следует ввести на потери энергии (5.2) поправку $\psi > 1$

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_l &= \psi \frac{Q^2}{K_4^2} l \\ \psi &= \left(1 + \frac{68 \nu}{9 \Delta_3}\right)^{0,25} = \left(1 + \frac{68}{Re} \frac{d}{\Delta_3}\right)^{0,25} = m^{0,25} \end{aligned} \right\}, \quad (5.11)$$

где

$$m = 1 + 68 \nu / (v \Delta_3) = 1 + 68 d / (Re \Delta_3), \quad (5.12)$$

или уменьшить модуль расхода K_4 (табл.5.1) в соответствии с формулой

$$K_3 = K_4 m^{-0,125} \quad (5.13)$$

Простой трубопровод имеет постоянный диаметр d по всей длине l и не имеет ответвлений.

Для *последовательного* соединения простых трубопроводов полную потерю напора (энергии) определяют по формуле

$$\Delta h_l = Q^2 \sum (l_i / K_i^2) = Q^2 \sum a_i = Q^2 \sum (A_i l_i). \quad (5.14)$$

Потери напора на каждом участке определяются формулой (5.2).

При *параллельном* соединении простых трубопроводов потери напора в отдельных ветвях равны, т.е. $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h_3$ и т.д., а расходы Q_i распределяются по отдельным ветвям согласно зависимости

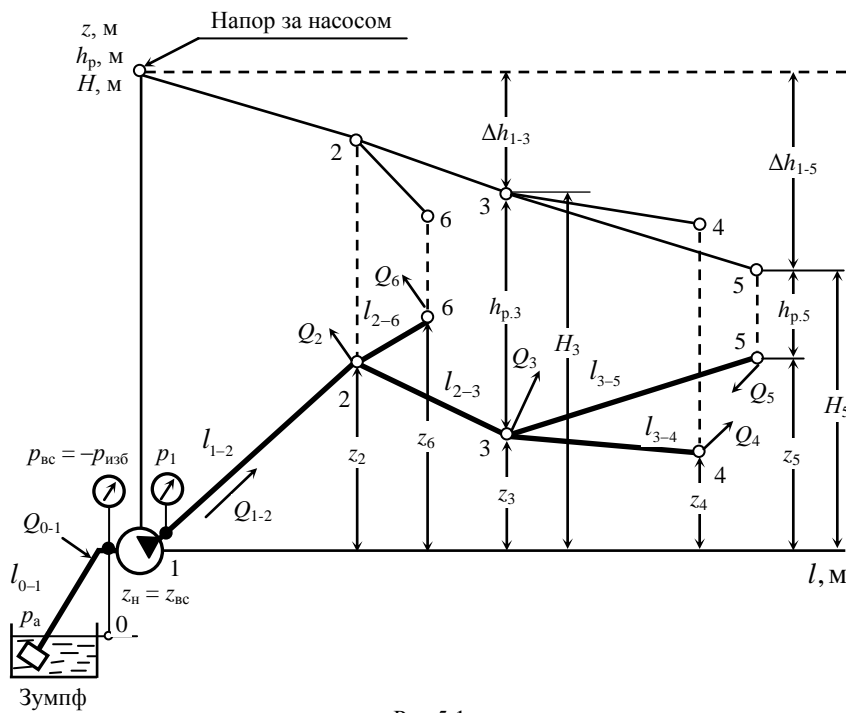


Рис.5.1

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{K_1}{K_2} \sqrt{\frac{l_2}{l_1}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_1 l_1}} \\ \frac{Q_1}{Q_3} &= \frac{K_1}{K_3} \sqrt{\frac{l_3}{l_1}}, \quad \text{и т.д.} \end{aligned} \right\} \quad (5.15)$$

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

$$\Delta h_l = 0,333 Q_0^2 l / K^2, \quad (5.16)$$

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

$$\Delta h_l = (Q^2 - Q Q_0 + 0,333 Q_0^2) / K^2; \quad Q = Q_{тр} + Q_0. \quad (5.17)$$

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

На **рис.5.1** дан пример распределительной сети.

В соответствии с заданием (см. задачу 5.14. и табл.5.2) в пределах РГР необходимо:

- построить в масштабе по координатам l (длина) и z (геодезическая отметка) профиль трассы;
- 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 ;
- определить высоту установки насоса над уровнем воды в зумпфе (высоту всасывания $z_{вс}$) и мощность $N_{дв}$ на валу центробежного насоса (мощность приводного двигателя).

Задано:

- узловые расходы Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6 ;
- геодезические отметки пунктов потребления z_2, z_3, z_4, z_5, z_6 ;
- приведенные длины участков, учитывающие находящиеся на них местные сопротивления $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{35}, l_{26}$;
- рабочий напор $h_{зад}$, ниже которого не может быть фактический, полученный расчетом рабочий напор h_p ($h_{зад}$ задается преподавателем дополнительно);
- коэффициент полезного действия (КПД) насоса η_n ;
- частота вращения рабочего колеса насоса n , об/мин;
- вид труб (табл.5.1). Задается преподавателем дополнительно.

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

Согласно рис.5.1 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 $(\Sigma Q)_{\max}$ и $(\Sigma l)_{\max}$ 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 (уч. 3-5). Предварительно определить диаметр d'_{3-5} , используя рекомендацию об ориентировочных скоростях жидкости: при $Q = 6-50$ л/с $v_{\text{пр}} = 0,7-1,0$ м/с; при $Q = 50-120$ л/с $v_{\text{пр}} = 1,0-1,4$ м/с;

$$d'_{3-5} = \sqrt{4Q_{3-5} / \pi v_{\text{пр}}} = 1,13 \sqrt{Q_{3-5} / v_{\text{пр}}}. \quad (5.18)$$

Далее по табл.5.1 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

$$v_{3-5} = 4Q_{3-5} / \pi d_{3-5}^2. \quad (5.19)$$

Определить число Рейнольдса по выражению (3.16) и вязкость (1.12) для воды.

Установить фактическую область сопротивления, используя рекомендации к цепочке (5.9). Если $Re > 500d_{3-5} / \Delta_3$, найденный по табл.5.1 модуль расхода K'_{3-5} должен быть принят для дальнейших расчетов. Если $Re < 500d_{3-5} / \Delta_3$, следует определить поправку m по формуле (5.12) и откорректировать K'_{3-5} по формуле (5.13). Получим фактический модуль K_{3-5} .

Определить потери напора на участке 3-5 Δh_{3-5} используя выражение (5.2).

Определить полный гидростатический напор в конце участка

$$H_5 = z_5 + h_{\text{зад}}; \quad (5.20)$$

в начале участка

$$H_3 = H_5 + \Delta h_{3-5}. \quad (5.21)$$

Определить рабочий напор в начале участка

$$h_{p,3} = H_3 - z_3 \quad (5.22)$$

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

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.

Если $h_{p,3} < h_{\text{зад}}$, следует определить величину недостающего напора

$$\delta = h_{\text{зад}} - h_{p,3} \quad (5.23)$$

и на величину δ 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 $h_{\text{зад}}$, а напор $h_{p,5}$ будет больше заданного. Точки H_5 и H_3 соединить на графике прямой линией.

Расчет ветви. Для примера примем ветвь 3-4.

Определить предварительно полный гидростатический напор в конце ветви (точка 4)

$$H'_4 = z_4 + h_{\text{зад}}. \quad (5.24)$$

Значение аналогичного напора в начале ветви H_3 было определено при расчете магистрали (5.21).

Диаметр труб на участке 3-4 (d_{3-4}) определяется по величине допустимой потери напора в ветви $[\Delta h_{3-4}]$ следующим образом:

$$[\Delta h_{3-4}] = H_3 - H'_4. \quad (5.25)$$

Определить предварительное значение модуля расхода

$$K'_{3-4} = Q_{3-4} \sqrt{\frac{l_{3-4}}{[\Delta h_{3-4}]}}. \quad (5.26)$$

Далее по табл.5.1 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 (5.19); определить критерий Re (3.16), установить фактическую область сопротивления (5.9). Если $Re > 500d_{3-5} / \Delta_3$, найденный по табл.5.1 модуль K'_{3-4} принимается для дальнейших расчетов. Если $Re < 500d_{3-5} / \Delta_3$, следует определить поправку m (5.12) и откорректировать K'_{3-4} (5.13); получим фактический модуль K_{3-4} .

Определить фактическую потерю напора Δd_{3-4} по (5.2).

Сравнить Δh_{3-4} с $[\Delta h_{3-4}]$. Если $\Delta h_{3-4} < [\Delta h_{3-4}]$, приступить к определению гидростатического напора $H_4 = H'_4$ и построению ПЛ для участка 3-4. Если $\Delta h_{3-4} > [\Delta h_{3-4}]$, следует вернуться к табл.5.1 методики и выбрать следующее большее значение модуля K''_{3-4} . Для K''_{3-4} найти по табл. 5.1 новый d_{3-4} , который будет больше ранее выбранного.

Повторить действия после формулы (5.26); найти новое значение потерь напора Δh_{3-4} , которое снова сравнить с $[\Delta h_{3-4}]$.

Определить фактический напор в точке 4

$$H_4 = H_3 - \Delta h_{3-4}; \quad (5.27)$$

найти рабочий напор в точке 4 $h_{p,4}$ по (5.22).

Сравнить $h_{p,4}$ с $h_{зад}$. Если $h_{p,4} < h_{зад}$, следует определить δ (5.23) 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

$$N_{дв} = \frac{\rho g H_n Q_{1-2}}{\eta_n}, \quad (5.28)$$

где H_n – напор, создаваемый насосом; η_n – КПД насоса;

$$H_n = H_1 + Z_n + \frac{Q_{0-1}^2}{K_{0-1}^2} l_{0-1} + (\zeta + 1) \frac{v_{0-1}^2}{2g}; \quad (5.29)$$

H_1 – напор на выходе из насоса, определен при расчете участка 1-2 магистрали; ζ – суммарный коэффициент местных сопротивлений во всасывающей линии 0-1, задан в табл. 5.2; 0-1 – индексация параметров всасывающей линии 0-1; Z_n – предельно допустимая высота всасывания насоса по условиям его бескавитационной работы (для РГР – высота установки насоса над уровнем воды в зумпфе),

$$Z_n = \frac{p_a - p_{нп}}{\rho g} - \Delta h_{l_{0-1}} - \Delta h_{m_{0-1}} - [\Delta h]_к; \quad (5.30)$$

p_a – атмосферное давление; $p_{нп}$ – давление насыщенных паров [1]; $\Delta h_{l_{0-1}}$ – потери напора по длине всасывающего трубопровода (5.2); $\Delta h_{m_{0-1}}$ – местные потери напора (3.22); v_{0-1} – средняя скорость жидкости во всасывающем трубопроводе; $[\Delta h]_к$ – допустимый кавитационный запас,

$$[\Delta h]_к \approx \Delta h_k^{кр} \cdot 1,25; \quad (5.31)$$

$\Delta h_k^{кр}$ – критический кавитационный запас, определяется по формуле С.С.Руднева,

$$\Delta h_k^{кр} = 10(n\sqrt{Q}/C)^{\frac{4}{3}}; \quad (5.32)$$

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

Номер варианта	Участковые расходы, л/с					Длины участков, м						Геодезические отметки, м					Коэффициент местных сопротивлений ζ_{0-1}	Частота вращения насоса n , об/мин	КПД насоса, η_n
	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}	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	15	900	0,7
2	19	14	20	16	25	35	3000	2300	1100	3400	4200	47	35	50	33	60	17	900	0,69
3	20	19	15	27	21	40	2900	2400	1200	3300	4300	40	37	45	30	55	19	900	0,68
4	16	20	19	25	18	45	2800	2100	1300	3200	4400	44	40	56	33	65	18	900	0,66
5	13	16	21	27	19	50	2700	2200	1400	3100	4500	39	47	57	50	70	16	900	0,65
6	21	13	23	25	21	55	2600	2000	1500	3500	4600	43	39	59	45	68	20	1000	0,66
7	27	21	13	19	24	50	2500	2800	1600	3400	4700	42	35	62	56	66	21	1000	0,67
8	12	27	21	13	25	45	2400	2900	1700	3300	4800	37	40	65	57	67	22	1000	0,68
9	18	12	27	21	23	40	2300	3000	1800	3200	4900	39	33	66	59	41	19	1000	0,69
10	16	18	12	27	23	35	2200	3100	1900	3500	5000	40	35	67	62	55	17	1000	0,70
11	25	16	18	23	27	30	2100	3200	2600	3400	4900	43	41	68	65	33	15	1100	0,65
12	23	25	16	18	22	55	2000	3300	2500	1700	4800	45	50	70	66	35	16	1100	0,66
13	19	23	25	16	27	50	2100	3200	2600	1600	4700	40	47	68	61	39	19	1100	0,67
14	17	19	29	21	13	45	2200	3100	2700	1500	4600	37	55	67	60	44	20	1100	0,68
15	21	17	19	29	23	40	2300	3000	2800	1400	4500	35	50	65	39	46	21	1100	0,69
16	15	21	18	25	19	35	2400	2900	3500	1300	4400	33	54	63	42	39	22	1200	0,7

Окончание табл. 5.2

Номер варианта	Участковые расходы, л/с					Длины участков, м						Геодезические отметки, м					Коэффициент местных сопротивлений ζ_{0-1}	Частота вращения насоса n , об/мин	КПД насоса, η_n
	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}	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6			
17	27	15	19	21	12	30	2500	2800	3400	1200	4300	30	55	61	44	70	21	1200	0,71
18	25	27	15	19	21	35	2600	2700	3300	1100	4200	35	47	60	55	70	20	1200	0,72
19	18	25	23	15	29	40	2700	2600	3200	1700	4100	39	46	63	51	68	19	1200	0,73
20	17	18	25	23	15	45	2800	2500	3100	1800	4000	42	49	61	57	66	18	1200	0,74
21	23	17	18	25	13	50	2900	2400	3000	1900	5000	31	53	68	45	39	17	900	0,75
22	19	23	17	21	29	55	3000	2300	1700	2000	4900	36	48	65	53	42	16	900	0,74
23	16	19	23	27	20	45	3100	2200	1600	2700	4800	42	54	64	39	69	15	900	0,73
24	15	16	25	23	19	40	3200	2100	1500	3500	4700	44	57	67	37	51	20	900	0,72
25	12	15	21	27	18	35	3300	2000	1400	3600	4600	38	55	69	49	33	22	900	0,71