

Калинин Тимофей Александрович, Студент,
Санкт-Петербургский Горный Университет
императрицы Екатерины II
Kalinin Timofey Aleksandrovich,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ТРАССЫ ТРУБОПРОВОДОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ BUILDING A PIPELINE TRACK PROFILE DISTRIBUTION NETWORK

Аннотация. В статье представлен поэтапный расчет распределительной сети трубопроводов с последующим построением профиля трассы. Выполнен выбор магистрального направления и прилегающей ветви, произведен расчет требуемых диаметров труб, определены гидростатические и рабочие напоры в узловых точках сети.

Abstract. The article presents a step-by-step calculation of the distribution pipeline network, followed by the construction of the route profile. The selection of the main direction and the adjacent branch was performed, the required pipe diameters were calculated, and the hydrostatic and working pressures at the network nodes were determined.

Ключевые слова: Распределительная сеть, профиль трассы, потери напора, рабочий напор, мощность насоса, трубопровод.

Keywords: Distribution network, track profile, head losses, working head, pump power, pipeline.

Исходные данные

Таблица 1

Узловые расходы, л/с

Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
27	15	19	21	12

Таблица 2

Геодезические отметки пунктов потребления, м

Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6
30	55	61	44	70

Таблица 3

Приведенные длины участков, м

L_{0-1}	L_{1-2}	L_{2-3}	L_{3-4}	L_{4-5}	L_{2-6}
30	2500	2800	3400	1200	4300

Таблица 4

Другие величины

$H_{зад}$, м	$\Delta_э$, мм	Тип трубы	n, об/мин	η , %	ζ	$p_{атм}$, Па	$p_{нп}$, Па при 20°C
17	0,2	Стальные старые	1200	71	21	101325	2338,8



Выбор магистрали:

В магистраль должны входить последовательно соединенные участки, наиболее нагруженные по расходу и имеющие сравнительно большую протяженность.

Рассмотрим 2 участка магистрали: 1-2-3-4-5 и 1-2-6.

Первый участок:

$$Q_{4-5} = Q_5 = 21 \text{ л/с} \quad (1)$$

$$Q_{3-4} = Q_{4-5} + Q_4 = 21 + 19 = 40 \text{ л/с} \quad (2)$$

$$Q_{2-3} = Q_{3-4} + Q_3 = 40 + 15 = 55 \text{ л/с} \quad (3)$$

$$Q_{1-2} = Q_{2-3} + Q_2 + Q_6 = 55 + 27 + 12 = 94 \text{ л/с} \quad (4)$$

$$\Sigma L_{1-5} = L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-5} = 2800 + 3400 + 1200 = 7400 \text{ м} \quad (5)$$

$$\Sigma Q_{1-5} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = 27 + 15 + 19 + 21 + 12 = 94 \quad (6)$$

Второй участок:

$$Q_{2-6} = 12 \text{ л/с} \quad (7)$$

$$\Sigma Q_{2-6} = 12 \text{ л/с} \quad (8)$$

$$\Sigma L_{2-6} = L_{2-6} = 4300 \text{ м} \quad (9)$$

Сравнив результаты получаем, что ветвью является участок 2-6, а магистралью является участок 1-2-3-4-5.

Расчет участка 4-5:

Предварительно определяем диаметр по формуле:

$$d_{4-5} = 1,13 \sqrt{\frac{Q_{4-5}}{v_{np}}} \quad (10)$$

где Q_{4-5} - расход на участке 4-5, v_{np} - предельная скорость 0,8 м/с.

$$d_{4-5} = 1,13 \sqrt{\frac{21 \cdot 10^{-3}}{0,8}} = 0,183 \text{ м} \quad (11)$$

Затем округляем диаметр до ближайшего значения d_{4-5} по ГОСТу. И определяем расходную характеристику K_{4-5} для зоны развитого турбулентного течения и выбранного сортамента труб:

$$d_{4-5} = 0,2 \text{ м}; K'_{4-5} = 444,3 \text{ л/с}$$

Теперь определяем фактическую скорость течения по формуле:

$$v_{4-5} = \frac{4Q_{4-5}}{\pi d_{4-5}^2} \quad (12)$$

$$v_{4-5} = \frac{4 \cdot 21 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (0,2)^2} = 0,67 \text{ м/с}$$

После этого определяем число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v d_{4-5}}{\nu}; \quad (13)$$

$$Re = \frac{0,67 \cdot 0,2}{10^{-6}} = 134000$$

Устанавливаем фактическую область сопротивления путем сравнения:

$$\frac{500 d_{4-5}}{\Delta_3} = \frac{500 \cdot 0,2}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 500000$$

$$Re < \frac{500 d_{4-5}}{\Delta_3} \quad (14)$$

Т.к. число Рейнольдса оказалось меньше, следует определить поправку m

$$m = 1 + \frac{68d}{(Re \cdot \Delta_3)} \quad (15)$$

$$m = 1 + \frac{68 \cdot 0,2}{(134000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3})} = 1,507 \quad (16)$$

$$K_{4-5} = K'_{4-5} \cdot m^{-0,125} = 444,3 \cdot 1,507^{-0,125} = 422,097 \text{ л/с}$$

Определяем потери напора на этом участке:



$$h_{4-5} = \frac{Q_{4-5}^2}{K_{4-5}^2} \cdot L_{4-5}; \quad (17)$$

$$h_{4-5} = 1200 \cdot \frac{21^2}{422,097^2} = 2,97 \text{ м}$$

Определяем полный гидростатический напор в конце данного участка:

$$H_5 = Z_5 + h_{зад}; H_5 = 44 + 17 = 61 \text{ м} \quad (18)$$

Определяем гидростатический напор в начале данного участка:

$$H_4 = H_5 + h_{4-5}; H_4 = 61 + 2,97 = 63,97 \text{ м} \quad (19)$$

Определяем рабочий напор в начале участка:

$$h_{p.4} = H_4 - Z_4; h_{p.4} = 63,97 - 61 = 2,97 \text{ м} \quad (20)$$

Сравним $h_{p.4}$ и $h_{зад}$; $h_{p.4} < h_{зад}$; Значение рабочего напора не удовлетворяет заданию.

Поднимает на величину $\delta_4 = h_{зад} - h_{p.4} = 17 - 2,97 = 14,03 \text{ м}$

Тогда:

напор в начале участка:

$$H_4 = H_4 + \delta_4 = 63,97 + 14,03 = 78 \text{ м} \quad (21)$$

напор в конце участка:

$$H_5 = H_5 + \delta_4 = 61 + 14,03 = 75,03 \text{ м} \quad (22)$$

рабочий напор в начале участка:

$$h_{p.4} = H_4 - Z_4 = 78 - 44 = 34 \quad (23)$$

Теперь значения рабочего напора удовлетворяет заданию $h_{p.4} > h_{зад}$

Расчет участка 3-4:

Предварительно определяем диаметр по формуле:

$$d_{3-4} = 1,13 \sqrt{\frac{Q_{3-4}}{v_{np}}} \quad (24)$$

v_{np} - предельная скорость (0,8 м/с).

$$d_{3-4} = 1,13 \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,8}} = 0,253 \text{ м} \quad (25)$$

Затем округляем диаметр до ближайшего значения d_{3-4} по ГОСТ. И определяем расходную характеристику K'_{3-4} для зоны развитого турбулентного течения и выбранного сортамента труб:

$$d_{3-4} = 0,3 \text{ м}; K'_{3-4} = 1288 \text{ л/с}$$

Теперь определяем скорость течения по формуле:

$$v_{3-4} = \frac{4Q_{3-4}}{\pi d_{3-4}^2} \quad (26)$$

$$v_{3-4} = \frac{4 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (0,3)^2} = 0,566 \text{ м/с}$$

После этого определяем число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v d_{3-4}}{\nu}; Re = \frac{0,566 \cdot 0,3}{10^{-6}} = 169800 \quad (27)$$

Устанавливаем фактическую область сопротивления путем сравнения:

$$\frac{500 d_{3-4}}{\Delta_3} = \frac{500 \cdot 0,3}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 750000$$

$$Re < \frac{500 d_{3-4}}{\Delta_3} \quad (28)$$

Т.к. число Рейнольдса оказалось меньше, следует определить поправку m

$$m = 1 + \frac{68d}{(Re \cdot \Delta_3)} \quad (29)$$

$$m = 1 + \frac{68 \cdot 0,3}{(169800 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3})} = 1,6$$



$$K_{3-4} = K'_{3-4} \cdot m^{-0,125} = 1288 \cdot 1,6^{-0,125} = 1214,51 \text{ л/с} \quad (30)$$

Определяем потери напора на этом участке:

$$\Delta h_{3-4} = \frac{Q_{3-4}^2}{K_{3-4}^2} L_{3-4}; \quad (31)$$

$$h_{3-4} = 3400 \frac{40^2}{1214,51^2} = 3,688 \text{ м}$$

Определяем полный гидростатический напор в конце данного участка:

$$H_4 = 78 \text{ м}$$

Определяем гидростатический напор в начале данного участка:

$$H_3 = H_4 + h_{3-4}; H_3 = 78 + 3,688 = 81,688 \text{ м} \quad (32)$$

Определяем рабочий напор в начале участка:

$$h_{p,3} = H_3 - Z_3; h_{p,3} = 81,688 - 55 = 26,688 \text{ м} \quad (33)$$

Сравним $h_{p,3}$ и $h_{зад}$; $h_{p,3} > h_{зад}$;

Значение рабочего напора удовлетворяет заданию

Расчет участка 2-3:

Предварительно определяем диаметр по формуле:

$$d_{2-3} = 1,13 \sqrt{\frac{Q_{2-3}}{v_{np}}} \quad (34)$$

v_{np} – предельная скорость, 1,2 м/с

$$d_{2-3} = 1,13 \sqrt{\frac{55 \cdot 10^{-3}}{1,2}} = 0,242 \text{ м}$$

Затем округляем диаметр до ближайшего значения d_{2-3} по ГОСТ. И определяем расходную характеристику K_{2-3} для зоны развитого турбулентного течения и выбранного сортамента труб:

$$d_{2-3} = 0,25 \text{ м}; K'_{2-3} = 798,8 \text{ л/с}$$

Теперь определяем скорость течения по формуле:

$$v_{2-3} = \frac{4Q_{2-3}}{\pi d_{2-3}^2} \quad (35)$$

$$v_{2-3} = \frac{4 \cdot 55 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (0,25)^2} = 1,12 \text{ м/с}$$

После этого определяем число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v d_{2-3}}{\nu}; Re = \frac{1,12 \cdot 0,25}{10^{-6}} = 280000 \quad (36)$$

Устанавливаем фактическую область сопротивления путем сравнения:

$$\frac{500 d_{2-3}}{\Delta_3} = \frac{500 \cdot 0,25}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 625000 \quad (37)$$

$$Re < \frac{500 d_{2-3}}{\Delta_3} \quad (38)$$

Т.к. число Рейнольдса оказалось меньше, следует определить поправку m

$$m = 1 + \frac{68d}{(Re \cdot \Delta_3)} \quad (39)$$

$$m = 1 + \frac{68 \cdot 0,25}{(280000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3})} = 1,304 \quad (40)$$

$$K_{2-3} = K'_{2-3} \cdot m^{-0,125} = 798,8 \cdot 1,304^{-0,125} = 772,73 \text{ л/с} \quad (41)$$

Определяем потери напора на этом участке:

$$h_{2-3} = \frac{Q_{2-3}^2}{K_{2-3}^2} L_{2-3}; \Delta h_{2-3} = 2800 \frac{55^2}{772,73^2} = 14,185 \text{ м} \quad (42)$$

Определяем полный гидростатический напор в конце данного участка:

$$H_3 = 81,688 \text{ м}$$

Определяем гидростатический напор в начале данного участка:



$$H_2 = H_3 + h_{2-3}; H_2 = 81,688 + 14,185 = 95,873 \text{ м} \quad (43)$$

Определяем рабочий напор в начале участка:

$$h_{p,2} = H_2 - Z_2; h_{p,2} = 95,873 - 30 = 65,873 \text{ м} \quad (44)$$

Сравним $h_{p,2}$ и $h_{зад}$; $h_{p,2} > h_{зад}$;

Значение рабочего напора удовлетворяет заданию

Расчет участка 1-2:

Предварительно определяем диаметр по формуле:

$$d_{1-2} = 1,13 \sqrt{\frac{Q_{1-2}}{v_{np}}} \quad (45)$$

v_{np} – предельная скорость 1,1 м/с

$$d_{1-2} = 1,13 \sqrt{\frac{94 \cdot 10^{-3}}{1,2}} = 0,316 \text{ м}$$

Затем округляем диаметр до ближайшего значения d_{1-2} по ГОСТ. И определяем расходную характеристику K_{1-2} для зоны развитого турбулентного течения и выбранного сортамента труб:

$$d_{1-2} = 0,35 \text{ м}; K'_{1-2} = 1933 \text{ л/с}$$

Теперь определяем скорость течения по формуле:

$$v_{1-2} = \frac{4Q_{1-2}}{\pi d_{1-2}^2} \quad (46)$$

$$v_{1-2} = \frac{4 \cdot 94 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (0,35)^2} = 0,978 \text{ м/с}$$

После этого определяем число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v d_{1-2}}{\nu}; Re = \frac{0,978 \cdot 0,35}{10^{-6}} = 342300 \quad (47)$$

Устанавливаем фактическую область сопротивления путем сравнения:

$$\frac{500 d_{1-2}}{\Delta_3} = \frac{500 \cdot 0,35}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 875000 \quad (48)$$

$$Re < \frac{500 d_{1-2}}{\Delta_3} \quad (49)$$

Т.к. число Рейнольдса оказалось меньше, следует определить поправку m

$$m = 1 + \frac{68d}{(Re \cdot \Delta_3)} \quad (50)$$

$$m = 1 + \frac{68 \cdot 0,35}{(342300 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3})} = 1,348$$

$$K_{1-2} = K'_{1-2} \cdot m^{-0,125} = 1933 \cdot 1,348^{-0,125} = 1862,176 \text{ л/с} \quad (51)$$

Определяем потери напора на этом участке:

$$\Delta h_{1-2} = \frac{Q_{1-2}^2}{K_{1-2}^2} L_{1-2}; \Delta h_{1-2} = 2500 \frac{94^2}{1862,176^2} = 6,37 \text{ м} \quad (52)$$

Определяем полный гидростатический напор в конце данного участка:

$$H_2 = 95,873 \text{ м}$$

Определяем гидростатический напор в начале данного участка:

$$H_1 = H_2 + \Delta h_{1-2}; H_1 = 95,873 + 6,37 = 102,243 \text{ м} \quad (53)$$

Расчет ветви:

Определяем предварительно полный гидростатический напор в конце ветви:

$$H_6 = Z_6 + h_{зад}; H_6 = 70 + 17 = 87 \text{ м} \quad (54)$$

Определяем полный напор в начале ветви: $H_2 = 95,873 \text{ м}$

Определяем величину допустимых потерь напора в ветви:

$$[\Delta h_{2-6}] = H_2 - H_6; [\Delta h_{2-6}] = 95,873 - 87 = 8,873 \text{ м} \quad (55)$$

Определяем предварительное значение модуля расхода:



$$K'_{2-6} = Q_{2-6} \sqrt{\frac{L_{2-6}}{[\Delta h_{2-6}]}}; K'_{2-6} = 12 \sqrt{\frac{4300}{8,873}} = 264,168 \text{ л/с} \quad (56)$$

По ГОСТ определяем ближайшее значение K и соответствующее ему значение d_{2-6}
 $d_{2-6} = 0,2 \text{ м}$

Теперь определяем скорость течения по формуле:

$$v_{2-6} = \frac{4Q_{2-6}}{\pi d_{2-6}^2} \quad (57)$$

$$v_{2-6} = \frac{4 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (0,2)^2} = 0,382 \text{ м/с}$$

После этого определяем число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d_{2-6}}{\nu}; Re = \frac{0,382 \cdot 0,2}{10^{-6}} = 76400 \quad (58)$$

Устанавливаем фактическую область сопротивления путем сравнения:

$$\frac{500d_{2-6}}{\Delta_3} = \frac{500 \cdot 0,2}{10^{-3}} = 100000 \quad (59)$$

$$Re < \frac{500d_{2-6}}{\Delta_3} \quad (60)$$

Т.к. число Рейнольдса оказалось меньше, следует определить поправку m

$$m = 1 + \frac{68d}{(Re \cdot \Delta_3)} \quad (61)$$

$$m = 1 + \frac{68 \cdot 0,2}{(76400 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3})} = 1,89$$

$$K_{2-6} = K'_{2-6} \cdot m^{-0,125} = 264,168 \cdot 1,89^{-0,125} = 264,168 \text{ л/с} \quad (62)$$

Определяем фактические потери напора на этом участке:

$$\Delta h_{2-6} = \frac{Q_{2-6}^2}{K_{2-6}^2} L_{2-6}; \Delta h_{2-6} = 4300 \frac{12^2}{264,168^2} = 8,873 \text{ м} \quad (63)$$

Сравниваем Δh_{2-6} и $[\Delta h_{2-6}]$; $\Delta h_{2-6} = [\Delta h_{2-6}]$.

Определяем пьезометрический напор:

$$H_6 = H_2 - h_{2-6} = 95,873 - 8,873 = 87 \text{ м} \quad (64)$$

Определяем рабочий напор:

$$h_{p,6} = H_6 - Z_6; h_{p,6} = 87 - 70 = 17 \text{ м} \quad (65)$$

Сравним $h_{p,6}$ и $h_{зад}$; $h_{p,6} = h_{зад}$; Значение рабочего напора удовлетворяют заданию.

Определение приводной мощности насоса:

Мощность приводного двигателя насоса определяется по формуле:

$$N_{дв} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_n \cdot Q_{1-2}}{\eta} \quad (66)$$

где H_n – напор, создаваемый насосом, который рассчитывается по формуле:

$$H_n = H_1 + Z_n + \frac{Q_{1-2}^2 \cdot L_{1-2}}{K_{1-2}^2} + (\zeta + 1) \cdot \frac{v_{1-2}^2}{2g} \quad (67)$$

где Z_n – предельно допустимая высота всасывающей линии, рассчитываемая по формуле:

$$Z_n = \frac{p_{атм} - p_{нп}}{\rho g} - \Delta h_{1-2} - \Delta h_{м0-1} - [\Delta h]_k \quad (68)$$

где $[\Delta h]_k = 1,25 \cdot \Delta h_k^{kp}$ – допустимый кавитационный запас; (69)

$$\Delta h_k^{kp} = 10 \left(n \sqrt{Q_{1-2}} / C \right)^{\frac{4}{3}} - \text{критический кавитационный запас}; \quad (70)$$

$$\Delta h_{м0-1} = \zeta \frac{v_{1-2}^2}{2g} - \text{местные потери напора.} \quad (71)$$

$$[\Delta h]_k = 1,25 \cdot 10 \cdot \left(\frac{1200 \cdot \sqrt{94 \cdot 10^{-3}}}{60 \cdot 1000} \right)^{\frac{4}{3}} = 0,014 \text{ м}$$



$$\Delta h_{m0-l} = 21 \cdot \frac{0,978^2}{2 \cdot 9,81} = 1,02 \text{ м}$$

$$Z_H = \frac{101325 - 2338,8}{1000 \cdot 9,81} - 6,37 - 1,02 - 0,014 = 2,69 \text{ м}$$

$$H_H = 102,243 + 2,69 + \frac{94^2 \cdot 2500}{1862,176^2} + (21 + 1) \cdot \frac{0,978^2}{2 \cdot 9,81} = 112,376 \text{ м}$$

$$N_{\text{дв}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 112,376 \cdot 94 \cdot 10^{-3}}{0,71} = 145952,68 \text{ (Вт)} = 145,95 \text{ кВт}$$

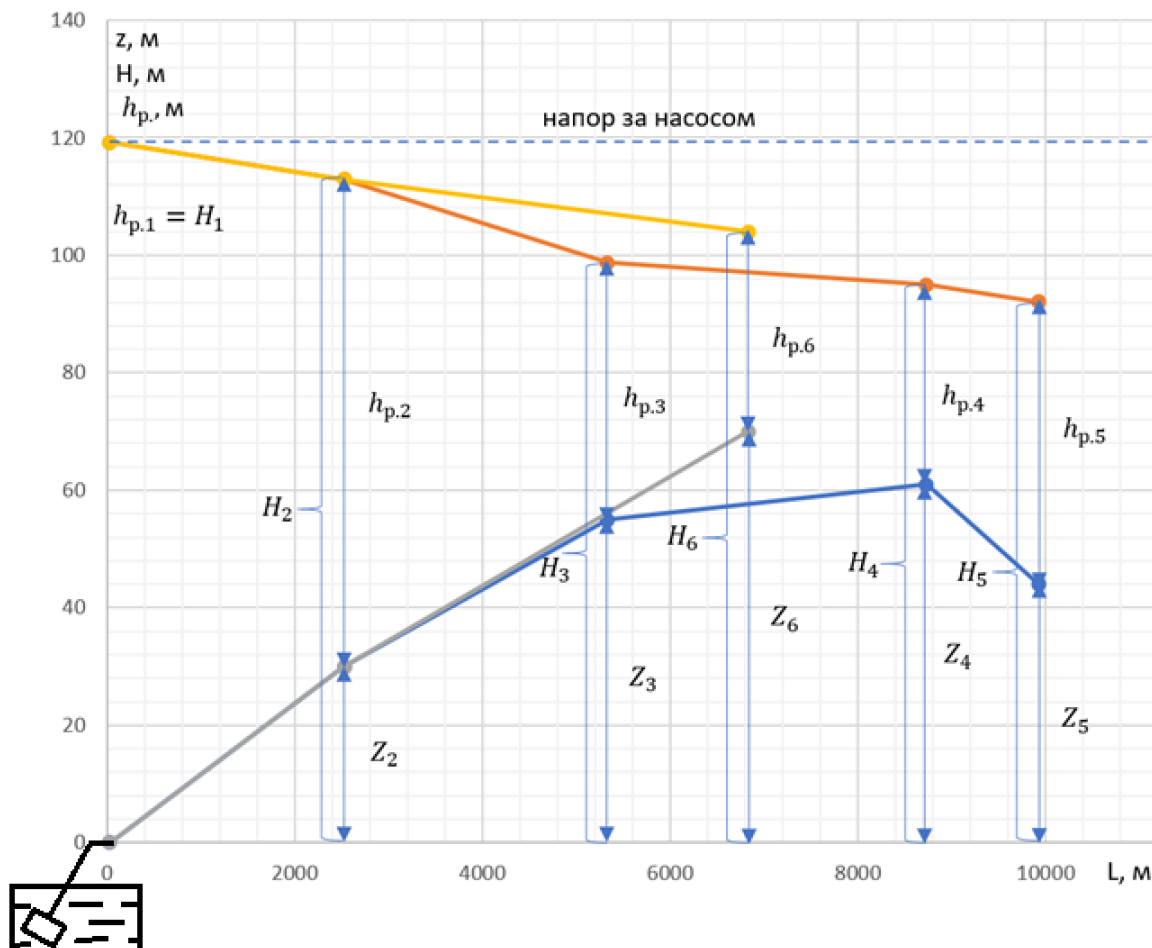


Рисунок 1. Построенный профиль трассы.

Список литературы:

1. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные.
2. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие.
3. СП 31.13330.2021 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
4. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. Учебник для вузов.
5. Лобачев П.В. Насосы и насосные станции.

