


МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства  
Кафедра «Санитарно-технические системы»

Утверждено на заседании кафедры  
«Санитарно-технические системы»  
«20» января 2022 г., протокол № 5

Заведующий кафедрой

 Р.А. Ковалев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по выполнению курсовой работы  
по дисциплине (модулю)  
«Гидравлика напорных потоков»**

**основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы магистратуры**

по направлению подготовки  
**08.04.01 – "Строительство"**

с профилем  
**"Водоснабжение и водоотведение"**

Форма(ы) обучения: очная, заочная

Идентификационный номер образовательной программы: 080401-01-22

Тула 2022 год

## Разработчик(и) методических указаний

Белоусов Р.О., доцент, к.т.н., доцент  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



---

(подпись)

## 1. Задание

Вода из точки водозабора насосом подается в бак, из которого перетекает в точку «К».

Исходные данные для соответствующего варианта приведены в таблице на странице 3.

Требуется определить:

- Те величины, которые в таблице обозначены знаком вопроса. Величины давлений определить в тех единицах, которые указаны в таблице.
- Силу давления воды на люк в стенке бака и глубину погружения точки приложения этой силы (центр давления).
- Расходы воды на **всех** участках водоводов (как до бака, так и после него) и режимы движения воды в них.
- Какова будет скорость истечения воды из отверстия расположенного в дне баке.
- Определить увеличение давления в водоводе 2 при аварийной остановке насоса

## 3. Исходные данные

- Исходные данные приведены в таблице.
- В таблице использованы следующие сокращения: “м. рт. ст.” – метры ртутного столба; “м. в. ст.” – метры водяного столба; “ман” – манометрическое давление; “вак” – вакуметрическое давление, “абс” – абсолютное давление.
- Считать уровень воды в баке постоянным, (то есть сколько воды поступает по водоводу 2 в бак, столько и отводится по водоводу 3).
- Плотность: воды –  $1000 \text{ кг/м}^3$ , спирта –  $790 \text{ кг/м}^3$ , ртути –  $13600 \text{ кг/м}^3$ .
- Атмосферное давление: 0,755 м. рт. ст.
- Коэффициент кинематической вязкости воды:  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
- Абсолютная эквивалентная шероховатость водоводов ( $\Delta_{\text{экв}}$ ):

Диаметр, мм	25	32	40	50	65	80	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	1000
$\Delta_{\text{экв}}$ , мм	0,3				0,5			0,6		0,7		0,8		0,9		1,0		

- Модуль упругости воды  $E: 2 \cdot 10^9 \text{ Па}$
- Толщина стенки трубы, мм

Диаметр, мм	25	32	40	50	65	80	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	1000
Толщина стенки, мм	2,5				3			3,5		4		5		6		6,5		

- Потери напора на местные сопротивления считать равными 20% потерь напора по длине. Потерями напора в баке и насосе пренебречь.
- Коэффициент сопротивления отверстия в дне бака  $\xi_{отв}=0,06$

№1

$Z_0$ , м	100
$Z_1$ , м	?
$Z_2$ , м	93
Люк	Ø 0,5 м
$h_{\text{л}}$ , м	0,3
$\beta$ , град	45
$P_0$	ман 32 КПа
$P_1$	вак 0,1 ат
$P_2$	абс ? Бар
$Z_{\text{н}}$ , м	50
$Z_{\text{в}}$ , м	?
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	7
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,4
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	32 / 80
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	25 / 150
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	100 / 80
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	300 / 100
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	50 / 300
$Z_{\text{к}}$ , м	?
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	1,5
$h_{\text{к}}$ , м	3

Схема «бака»

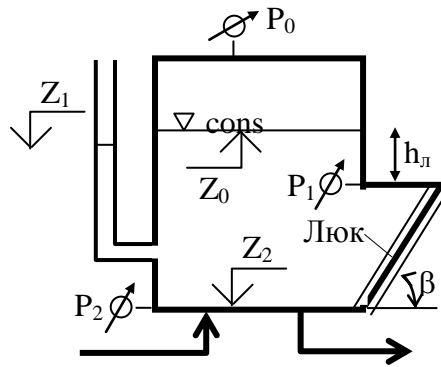


Схема «от точки водозабора до бака»

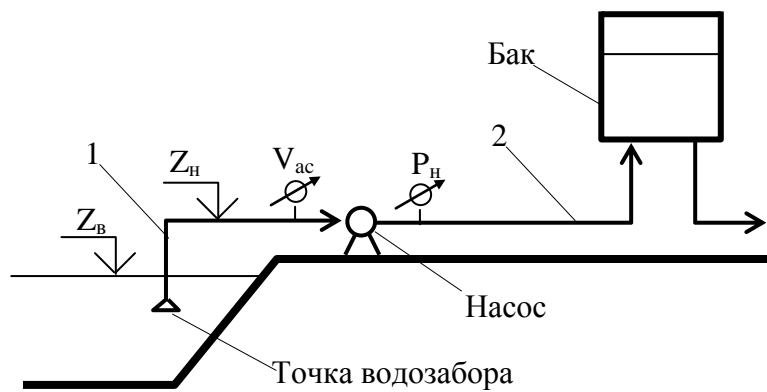
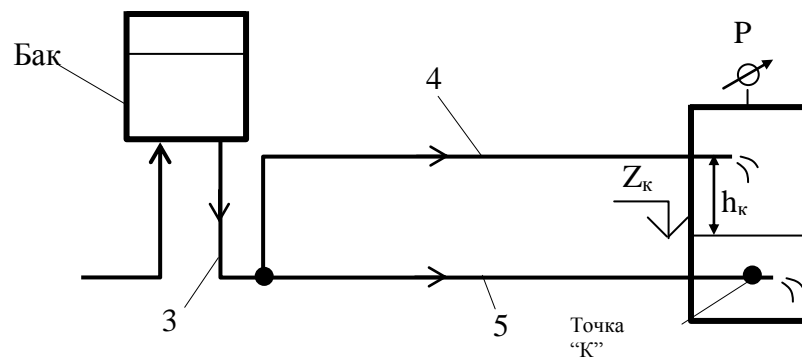


Схема «от бака до точки "К"»



$Z_0$ , м	120
$Z_1$ , м	115
$Z_2$ , м	110
Люк	0,3×0,2 м
$\beta$ , град	50
$P_0$	ман
	? ат
$P_1$	абс
	1,8 Бар
$P_2$	ман
	? м.в.ст
$Z_{\text{н}}$ , м	90
$Z_{\text{в}}$ , м	82
$P_{\text{в}}$ , абс, ат	?
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	8
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,5
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	300 / 12
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	200 / 75
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	250 / 150
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	80 / 200
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	400 / 100
Водовод 6: Диаметр, мм / Длина, м	600 / 300
$Z_{\text{к}}$ , м	?
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	0,5

Схема «бака»

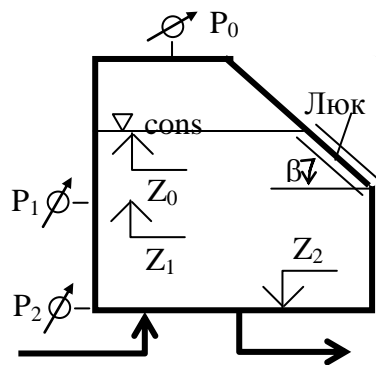


Схема «от точки водозабора до бака»

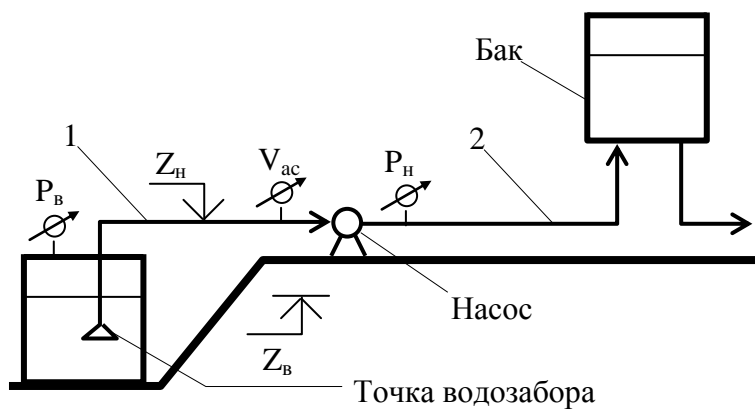
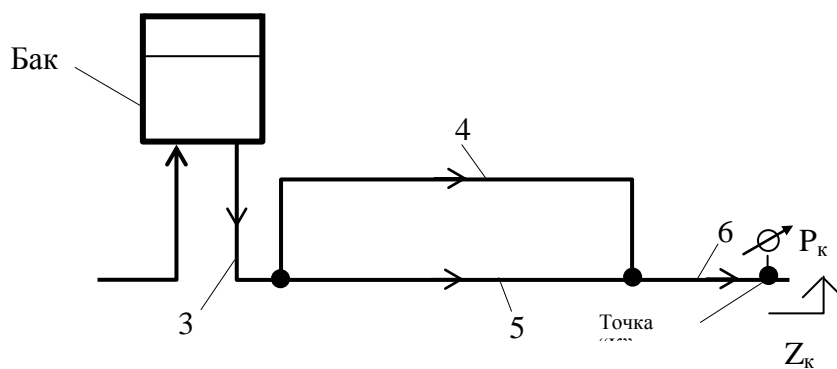


Схема «от бака до точки “К”»





$Z_0$ , м	?
$Z_1$ , м	100
$Z_2$ , м	90
Люк	Ø 0,4 м
$h_{\text{л}}$ , м	0,5
$\beta$ , град	55
$\Delta h_1$ , м	2,5
$P_0$	абс
	? ат
$P_1$	абс
	? м.в.ст
$Z_{\text{н}}$ , м	70
$Z_{\text{в}}$ , м	61
$P_{\text{в}}$ , абс, ат	2
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	?
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,3
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	900 / 70
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	800 / 300
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	800 / 50
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	100 / 400
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	700 / 700
$Z_{\text{к}}$ , м	?
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	2
$h_{\text{к}}$ , м	5

Схема «бака»

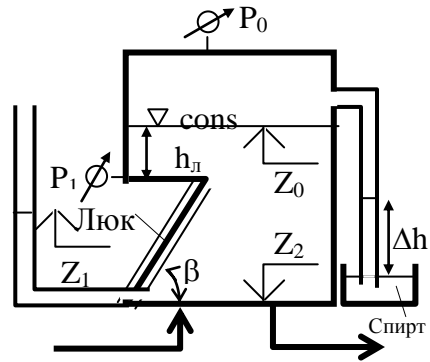


Схема «от точки водозабора до бака»

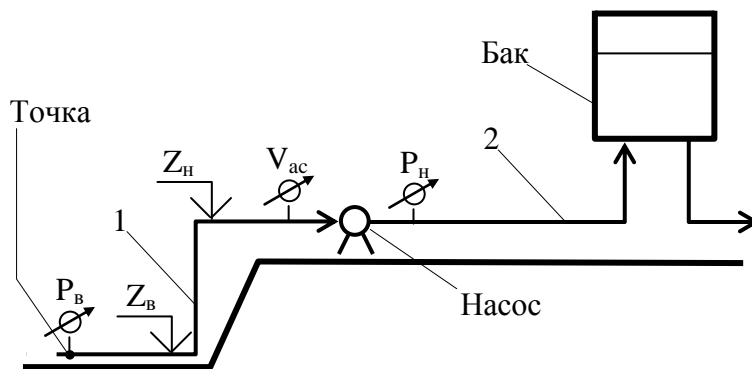
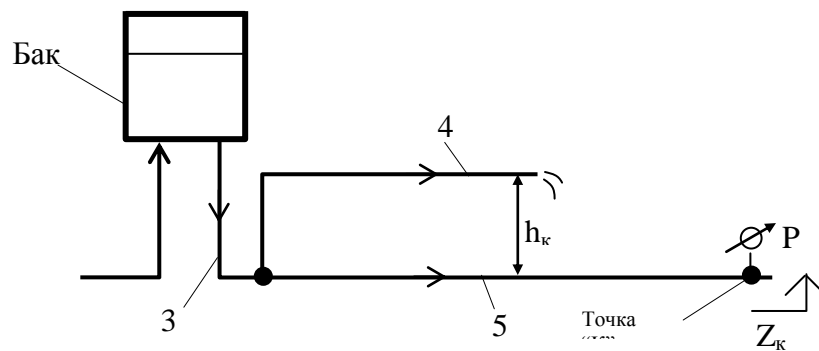


Схема «от бака до точки «К»»



$Z_0$ , м	?
$Z_1$ , м	50
$Z_2$ , м	?
Люк	0,6×0,4 м
$h_{л}$ , м	0,6
$\Delta h_1$ , м	0,2
$P_0$	абс
	? КПа
$P_1$	ман
	0,7 ат
$P_2$	абс
	2 ат
$Z_H$ , м	10
$Z_B$ , м	9
$P_H$ , ман, ат	?
$V_{ас}$ , вак, ат	0,8
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	400 / 50
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	300 / 400
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	700 / 100
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	65 / 30
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	500 / 350
$Z_K$ , м	?
$P_K$ , абс, ат	1,2
$h_K$ , м	1

Схема «бака»

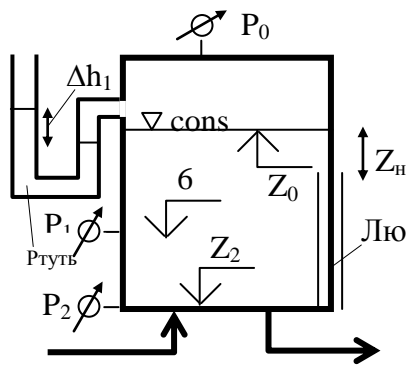


Схема «от точки водозабора до бака»

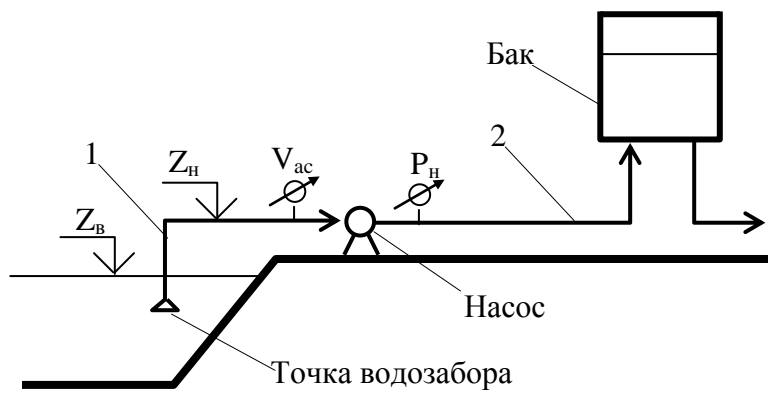
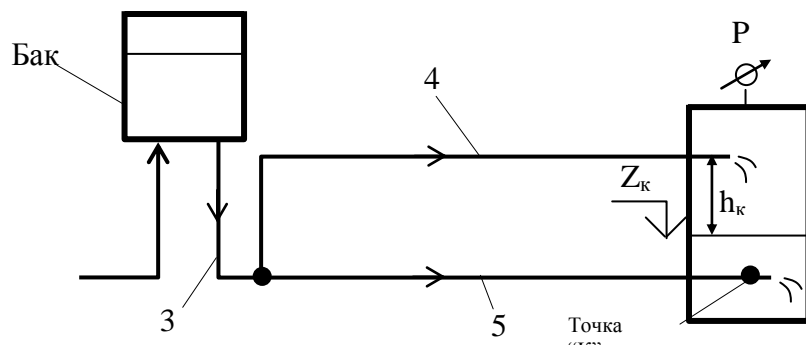
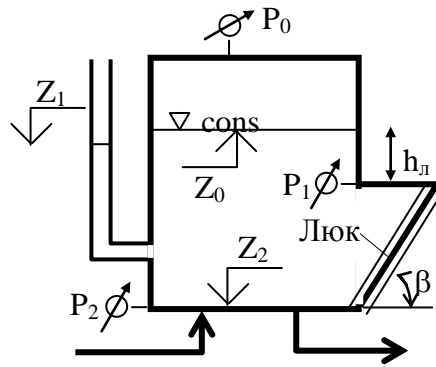


Схема «от бака до точки «К»»

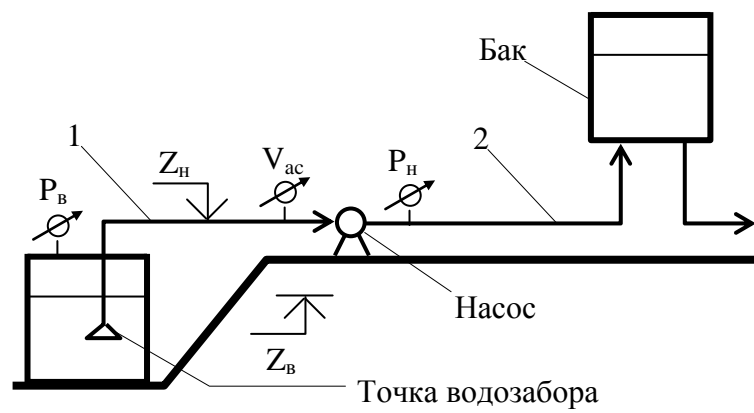


$Z_0$ , м	200
$Z_1$ , м	?
$Z_2$ , м	182
Люк	Ø 1 м
$h_{\text{л}}$ , м	?
$\beta$ , град	60
$P_0$	вак
	0,1 ат
$P_1$	ман
	0,2 бар
$P_2$	абс
	? мм.рт.ст
$Z_{\text{н}}$ , м	170
$Z_{\text{в}}$ , м	?
$P_{\text{в}}$ , абс, ат	1,2
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	5
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,5
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	700 / 50
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	600 / 100
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	800 / 150
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	100 / 300
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	500 / 500
Водовод 6: Диаметр, мм / Длина, м	800 / 100
$Z_{\text{к}}$ , м	?
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	0,4

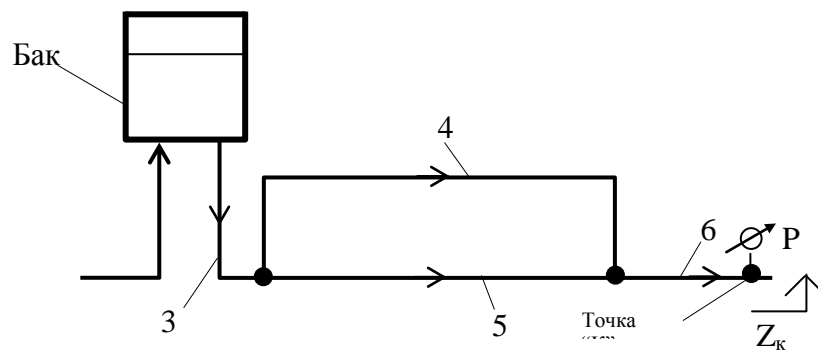
### Схема «бака»



### Схема «от точки водозабора до бака»



### Схема «от бака до точки “К”»



$Z_0$ , м	?
$Z_1$ , м	170
$Z_2$ , м	?
Люк	0,2×0,1 м
$h_{\text{л}}$ , м	0,8
$\beta$ , град	65
$P_0$	ман
	0,1 м.рт.ст
$P_1$	абс
	? Бар
$P_2$	абс
	15 м.в.ст
$Z_{\text{н}}$ , м	140
$Z_{\text{в}}$ , м	120
$P_{\text{в}}$ , абс, ат	?
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	9
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,6
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	100 / 20
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	80 / 500
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	800 / 200
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	1000 / 300
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	400 / 400
$Z_{\text{к}}$ , м	?
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	2
$h_{\text{к}}$ , м	8

Схема «бака»

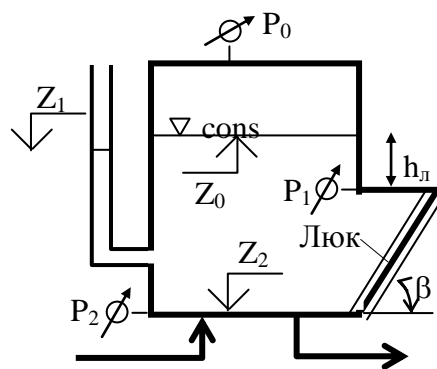


Схема «от точки водозабора до бака»

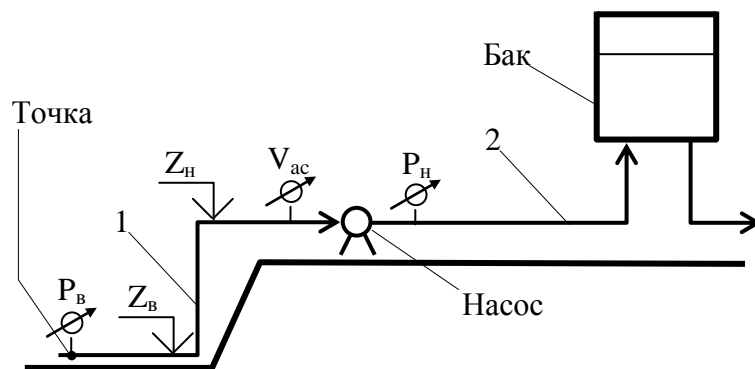
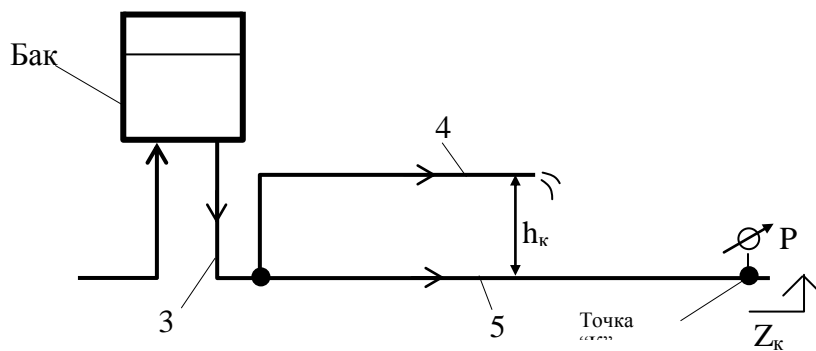


Схема «от бака до точки «К»»





$Z_0$ , м	90
$Z_1$ , м	85
$Z_2$ , м	82
Люк	Ø 0,7 м
$h_{\text{л}}$ , м	0,9
$\Delta h_1$ , м	?
$P_0$	вак
	0,3 ат
$P_1$	абс
	? Бар
$P_2$	ман
	? КПа
$Z_{\text{н}}$ , м	70
$Z_{\text{в}}$ , м	?
$P_{\text{в}}$ , абс, ат	3
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	6
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,4
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	50 / 55
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	32 / 250
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	400 / 300
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	600 / 500
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	250 / 300
Водовод 6: Диаметр, мм / Длина, м	100 / 100
$Z_{\text{к}}$ , м	10
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	?

Схема «бака»

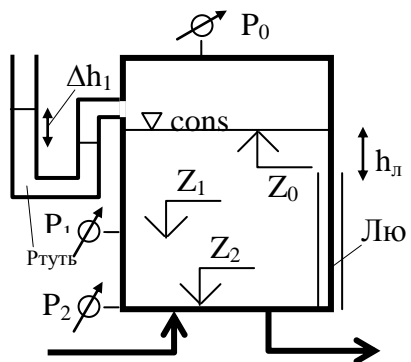


Схема «от точки водозабора до бака»

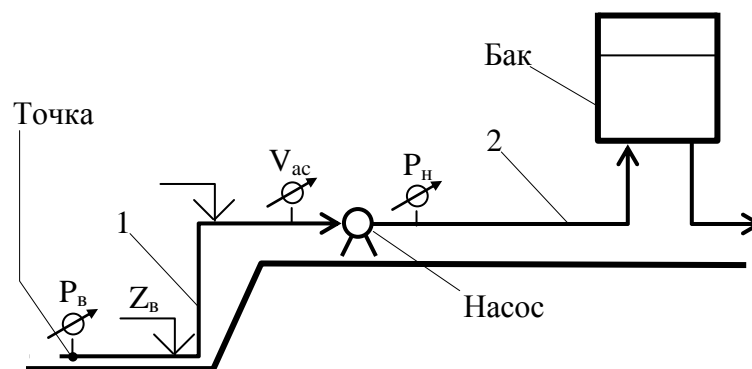
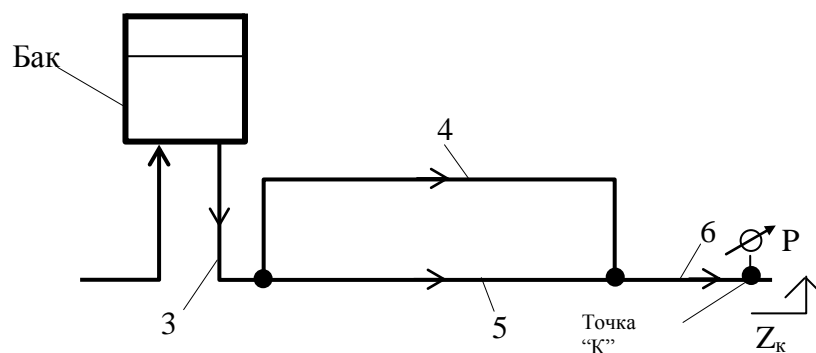


Схема «от бака до точки "К"»



$Z_0$ , м	52
$Z_1$ , м	?
$Z_2$ , м	40
Люк	0,1×0,5 м
$h_{\text{л}}$ , м	?
$\beta$ , град	70
$\Delta h_1$ , м	?
$P_0$	вак
	0,4 ат
$P_1$	абс
	1 Бар
$Z_{\text{н}}$ , м	30
$Z_{\text{в}}$ , м	25
$P_{\text{в}}$ , абс, ат	1,5
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	?
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,7
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	400 / 30
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	250 / 150
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	700 / 300
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	80 / 200
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	300 / 250
$Z_{\text{к}}$ , м	?
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	3
$h_{\text{к}}$ , м	10

Схема «бака»

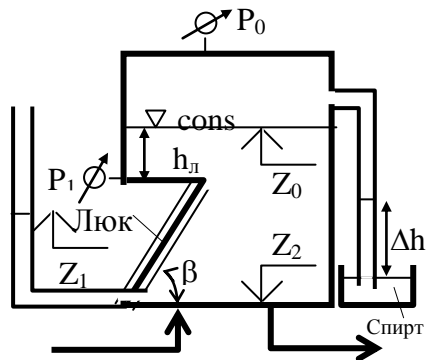


Схема «от точки водозабора до бака»

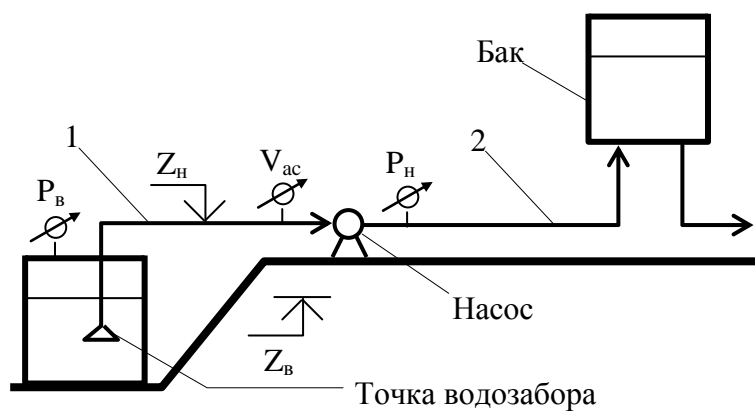
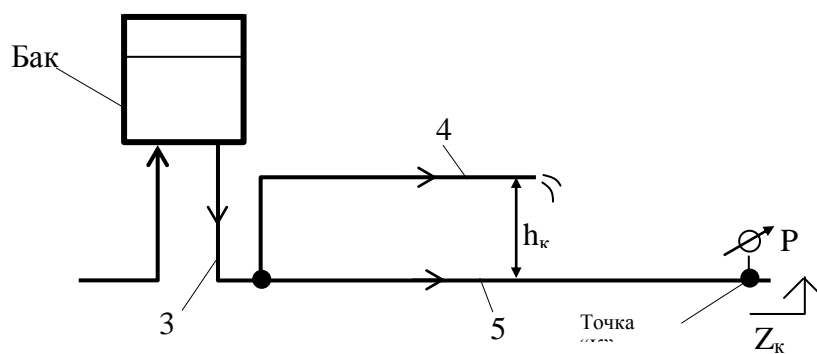


Схема «от бака до точки "К"»



$Z_0$ , м	95
$Z_1$ , м	91
$Z_2$ , м	?
Люк	Ø 0,2 м
$\beta$ , град	75
$P_0$	абс
	? Па
$P_1$	вак
	0,5 м.в.ст
$P_2$	ман
	0,8 ат
$Z_H$ , м	72
$Z_B$ , м	68
$P_H$ , ман, ат	?
$V_{ac}$ , вак, ат	0,6
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	1000 / 30
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	800 / 300
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	900 / 100
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	200 / 200
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	500 / 300
$Z_K$ , м	?
$P_K$ , абс, ат	2
$h_K$ , м	12

Схема «бака»

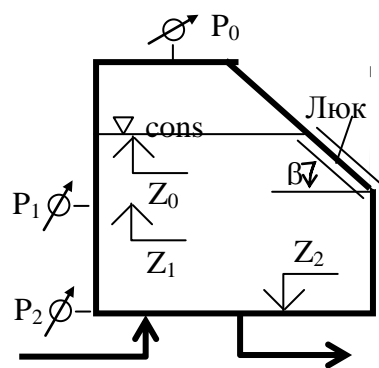


Схема «от точки водозабора до бака»

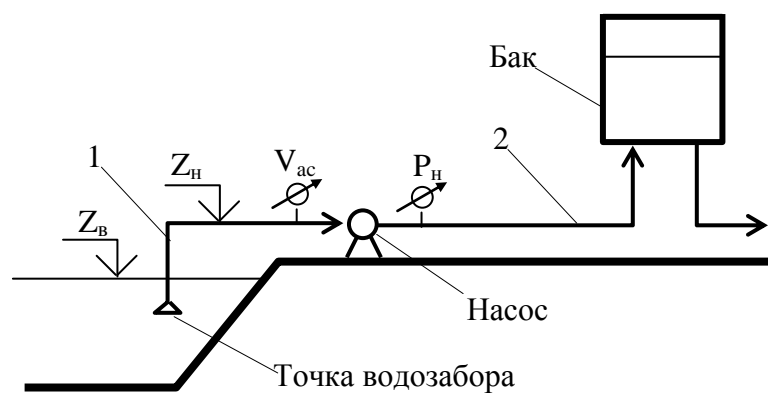
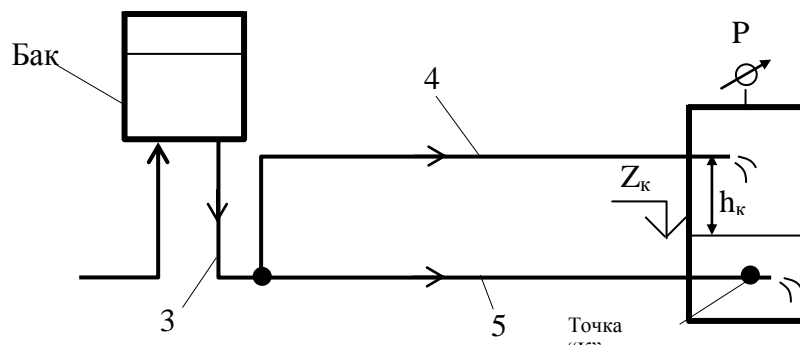


Схема «от бака до точки “К”»



$Z_0$ , м	?
$Z_1$ , м	70
$Z_2$ , м	?
Люк	0,3×0,7 м
$h_{\text{л}}$ , м	0,1
$\beta$ , град	80
$P_0$	вак
	0,4 ат
$P_1$	ман
	8 м.в.ст
$P_2$	ман
	0,4 м.рт.ст
$Z_{\text{н}}$ , м	50
$Z_{\text{в}}$ , м	?
$P_{\text{в}}$ , абс, ат	0,9
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	8
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,7
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	200 / 80
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	100 / 1000
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	500 / 800
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	32 / 200
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	150 / 400
Водовод 6: Диаметр, мм / Длина, м	300 / 150
$Z_{\text{к}}$ , м	20
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	?

Схема «бака»

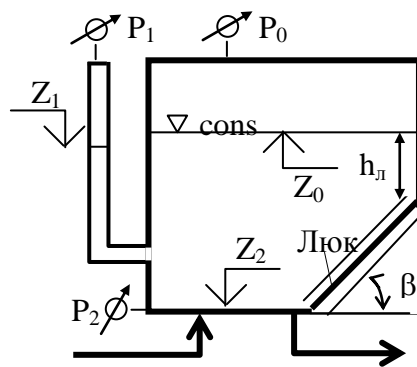


Схема «от точки водозабора до бака»

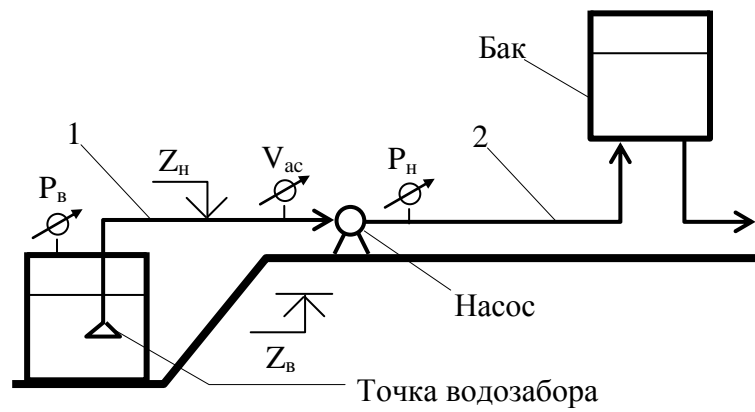
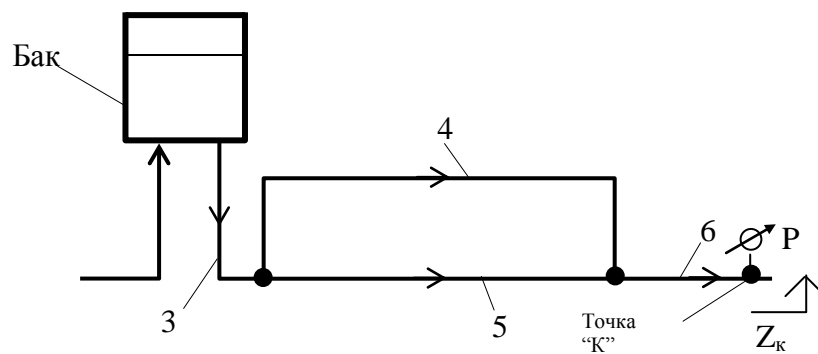


Схема «от бака до точки «К»»





$Z_0$ , м	80
$Z_1$ , м	?
$Z_2$ , м	65
Люк	0,9×0,6 м
$h_{\text{л}}$ , м	0,3
$\beta$ , град	40
$\Delta h_1$ , м	3
$P_0$	вак
	? Бар
$P_1$	абс
	? Па
$Z_{\text{н}}$ , м	30
$Z_{\text{в}}$ , м	?
$P_{\text{н}}$ , ман, ат	9
$V_{\text{ас}}$ , вак, ат	0,5
Водовод 1: Диаметр, мм / Длина, м	250 / 45
Водовод 2: Диаметр, мм / Длина, м	200 / 90
Водовод 3: Диаметр, мм / Длина, м	500 / 150
Водовод 4: Диаметр, мм / Длина, м	100 / 200
Водовод 5: Диаметр, мм / Длина, м	50 / 250
$Z_{\text{к}}$ , м	?
$P_{\text{к}}$ , абс, ат	0,5
$h_{\text{к}}$ , м	21

Схема «бака»

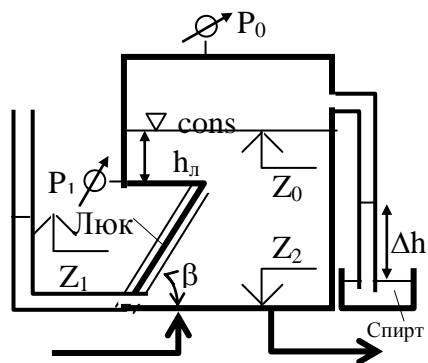


Схема «от точки водозабора до бака»

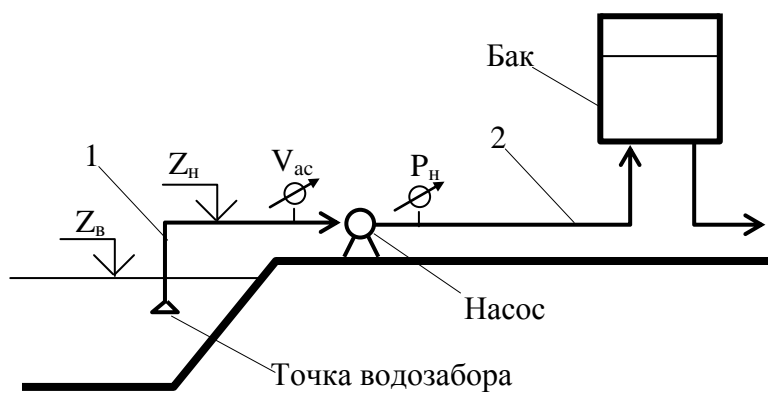
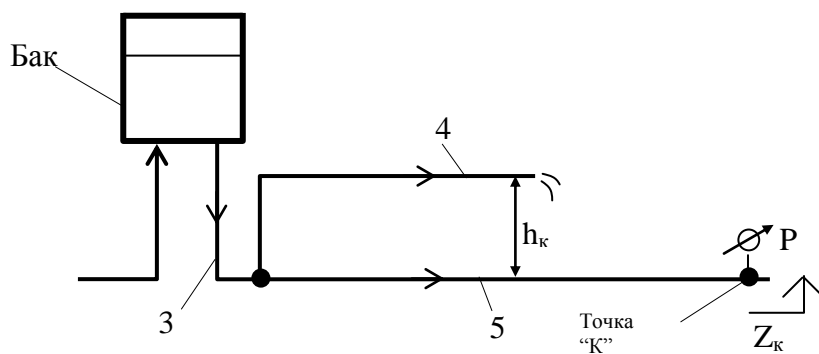
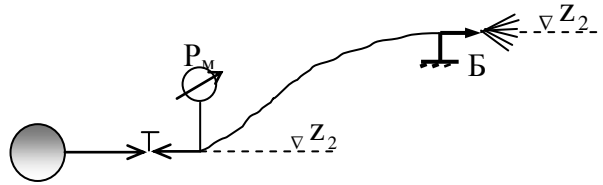


Схема «от бака до точки "К"»



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Расчет потока в простых трубопроводах



На отметке  $z_1$  к магистральному трубопроводу через задвижку подсоединен пожарный (выкидной) рукав (обычный прорезиновый) диаметром  $d_y$ , длиной  $l$ . Под действием давления  $p_m$  в начале рукава у пожарного брандспойта  $Б$ , расположенного на отметке  $z_2$ , создается давление  $p_6$ , в результате чего из брандспойта вылетает противопожарная струя воды с расходом  $Q$  (плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ).

Известно, что  $z_1 = 25 \text{ м}$ ,  $z_2 = 37 \text{ м}$ ,  $d_y = 50 \text{ мм}$ ,  $l = 120 \text{ м}$ ,  $Q = 5 \text{ л/с}$ . Определить давление  $p_m$ , если требуемое значение  $p_6 = 0,25 \text{ МПа}$ .

### Решение

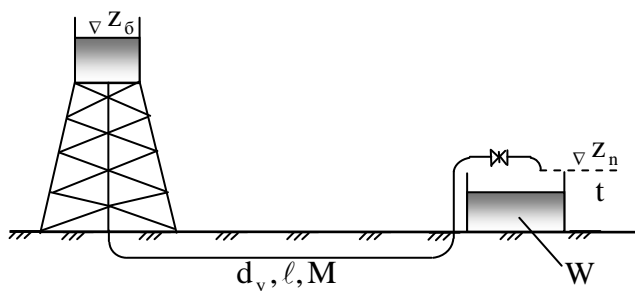
Для обычного прорезинового рукава диаметром  $d_y = 50 \text{ мм}$  по справочнику ([3], табл.3.10) находим удельное сопротивление  $A = 6770 (\text{с/м}^3)^2$ .

Потери напора в пожарном рукаве

$$h_1 = A l Q^2 = 6770 \times 120 \times 0,005^2 = 20,31 \text{ м}.$$

Искомое давление ([4], с.215)

$$\begin{aligned} p_m &= p_6 + \rho g [h_1 + (z_2 - z_1)] = 0,25 \times 10^6 + 1000 \times 9,81 \times \\ &\times [20,31 + (37 - 25)] = 0,53 \text{ МПа} \end{aligned}$$



К водонапорной башне, расчетный уровень воды в которой находится на отметке  $z_6$ , подсоединена труба диаметром  $d_y$ , длиной  $l$  из материала  $M$ . По этой трубе вода подается на отметку  $z_n$  для наполнения объема  $W$  не дольше, чем за интервал времени  $t$ . Расчет вести с использованием понятия "модуль расхода  $K$ ".

Известно, что  $z_6 = 24$  м,  $z_n = 15$  м,  $W = 12$  м<sup>3</sup>,  $t = 25$  мин,  $l = 860$  м. Подобрать необходимый диаметр  $d_y$  стальной электросварной неновой трубы.

### Р е ш е н и е

Минимальный возможный расход

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{12}{25 \times 60} = 0,008 \text{ м}^3/\text{с} = 8 \text{ л/с}.$$

Располагаемый напор (возможные потери напора):

$$h_n = z_6 - z_n = 24 - 15 = 9 \text{ м}.$$

Требуемый модуль расхода трубы ([2], с.117; [4], с.215)

$$K = Q \sqrt{\frac{l}{h_n}} = 8 \times \sqrt{\frac{860}{9}} = 78,2 \text{ л/с}.$$

По табл. 3.4 [3] находим, что для стальных электросварных труб ближайшее большее значение  $K_{\text{кв}} = 114,5$  л/с соответствует диаметру  $d_y = 125$  мм. (расчетный внутренний диаметр  $d = 113$  мм)

Скорость потока в трубе

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0,008}{3,14 \times 0,113^2} = 0,652 \text{ м/с}.$$

Поправочный коэффициент на скорость ([3], табл.3.5)  $n = 0,955$ . Модуль расхода неновой стальной электросварной трубы диаметром  $d_y = 125$  мм при скорости потока  $V = 0,652$  м/с

$$K = K_{\text{кв}} \times n = 114,5 \times 0,955 = 109,3 \text{ л/с},$$

что больше требуемого по условиям задачи ( $K = 78,2$  л/с). Следовательно, наполнение объема будет происходить меньше чем за 25 мин.

Найдем фактическое время наполнения, для чего методом подбора уточним значение расхода.

1. При  $K = 109,3$  л/с:

- расход:  $Q = K \sqrt{\frac{h_n}{l}} = 109,3 \times \sqrt{\frac{9}{860}} = 11,18 \text{ л/с};$

- скорость:  $V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0,01118}{3,14 \times 0,0133^2} = 0,91 \text{ м/с}.$

Поправочный коэффициент на скорость  $n = 0,977$ .

Модуль расхода  $K = 114,5 \cdot 0,977 = 111,86 \text{ л/с}.$

2. При  $K=111,86 \text{ л/с}:$

- расход:  $Q = 111,86 \sqrt{\frac{9}{860}} = 11,44 \text{ л/с};$

- скорость:  $V = \frac{4 \times 0,01144}{3,14 \times 0,0133^2} = 0,93 \text{ м/с}.$

Поправочный коэффициент на скорость  $n=0,981$ .

Модуль расхода  $K = 114,5 \times 0,981 = 112,32 \text{ л/с}.$

3. При  $k = 112,32 \text{ л/с}:$

- расход:  $Q = 112,32 \sqrt{\frac{9}{860}} = 11,49 \text{ л/с}.$

Разница в значениях расхода  $Q$  двух последних приближений

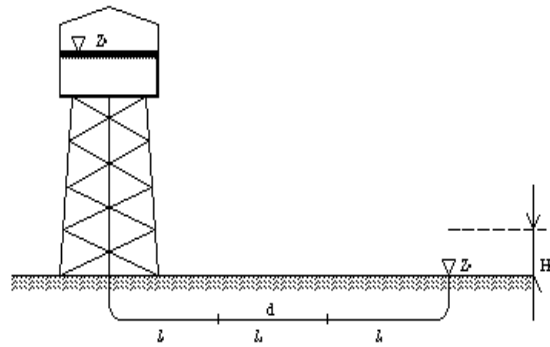
$$a = \frac{11,49 - 11,44}{11,49} \times 100 = 0,43 \%,$$

что считаем допустимым (меньше 1 %).

Искомый интервал времени наполнения

$$t = \frac{W}{Q} = \frac{12}{0,01149} = 1044 \text{ с} = 17,4 \text{ мин}.$$

## Расчет потока в простых и «дырчатых» трубопроводах



Вода в количестве  $Q$  подается из водонапорного бака к потребителю по трубопроводу диаметром  $d_y$ . Трубопровод имеет три участка труб из разных материалов: 1 – чугунная напорная не новая; 2 – стальная электросварная новая; 3 – асбестоцементная класса ВТ-9 типа 1; длины участков соответственно равны  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ . Отметки уровня воды в водонапорном баке  $z_6$ , поверхность земли у потребителя  $z_n$ ; свободный напор потребителя  $H_{св}$ .

Известно, что  $d_y = 100$  мм,  $l_1 = 250$  м,  $l_2 = 280$  м,  $l_3 = 300$  м,  $z_n = 115$  м,  $H_{св} = 20$  м. Определить требуемую отметку  $z_6$  при подаче расхода  $Q = 10$  л/с, используя понятие “удельное сопротивление трубы”.

### Р е ш е н и е.

Скорости потока воды в трубах диаметром  $d_y = 100$  мм (внутренним диаметром  $d$ , определяемым по табл. 3; 4 [3])

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0,01}{3,14 \times d^2} = \frac{0,127}{d^2} \text{ м/с}$$

Тогда:

- в чугунной напорной трубе ( $d = 102$  мм)

$$V_1 = \frac{0,127}{0,102^2} = 1,22 \text{ м/с};$$

- в стальной электросварной трубе ( $d = 114$  мм)

$$V_2 = \frac{0,127}{0,114^2} = 0,98 \text{ м/с};$$

- в асбестоцементной трубе ( $d = 100$  мм)

$$V_3 = \frac{0,127}{0,1^2} = 1,27 \text{ м/с}$$

Используя справочник [3], найдем удельные сопротивления  $A$  труб диаметром  $d_y = 100$  мм при вычисленных скоростях:

- не новая чугунная напорная труба (табл. 3.4 и 3.5) при  $V = 1,22$  м/с,  
 $A_{кв} = 311,7 (\text{с/м}^3)^2$ ;  $k = 1,0$ ;  $A_{(1)} = 311,7 \times 1 = 311,7 (\text{с/м}^3)^2$ ;

- новая стальная электросварная труба (табл. 3.4 и 3.7) при  $V = 0,98$  м/с,  
 $A_{кв} = 172,9 (\text{с/м}^3)^2$ ;  $\frac{A_{кв}}{A_1} = 1,44$ ;  $k_1 = 0,981$ ;

$$A_{(2)} = \frac{172,9}{1,44} \times 0,981 = 117,8 (\text{с/м}^3)^2;$$

- асбестоцементная труба (табл. 3.7 и 3.8) при  $V=1,27$  м/с

$$A_1=187,7(\text{с/м}^3)^2; \quad k_1=0,967;$$

$$A_{(3)}=187,7 \times 0,967=185,2(\text{с/м}^3)^2.$$

Потери напора потока ([4], с. 219) во всем трубопроводе

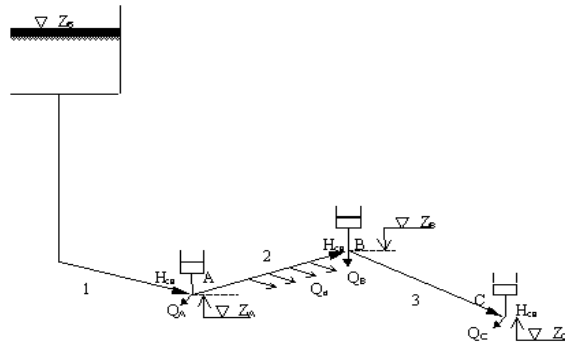
$$h_w = \left[ \sum_{i=1}^3 (A_i \times l_i) \right] \times Q^2,$$

то есть

$$h_w = (311,7 \times 250 + 117,8 \times 280 + 185,2 \times 300) \times 0,01^2 = 16,6 \text{ м.}$$

Искомая отметка уровня воды в водонапорном баке

$$z_0 = z_{\text{II}} + H_{\text{св}} + h_w = 115 + 20 + 16,6 = 151,6 \text{ м.}$$



Вода из водонапорного бака подается в три точки  $A$ ,  $B$  и  $C$  (фиксированные расходы  $Q_A$ ,  $Q_B$ ,  $Q_C$ ) и равномерно распределяется на участке 2 в количестве  $Q_n$ .

Отметки поверхности земли в узловых точках равны соответственно  $z_A$ ,  $z_B$ ,  $z_C$ , минимальное значение свободного напора  $H_{св}$ , отметка уровня воды в водонапорном баке  $z_6$ . Диаметры и длины участков соответственно следующие:  $d_{y1}$ ,  $l_1$ ;  $d_{y2}$ ,  $l_2$ ;  $d_{y3}$ ,  $l_3$ . При расчетах использовать понятие “удельное сопротивление трубы”. Известно, что трубы стальные водогазопроводные неновые,  $d_{y1}=150$  мм,  $l_1=260$  м,  $d_{y2}=125$  мм,  $l_2=130$  м,  $d_{y3}=100$  мм,  $l_3=210$  м. Отметки:  $z_A=116$  м,  $z_B=120$  м,  $z_C=110$  м. Расходы:  $Q_A=4$  л/с,  $Q_B=2$  л/с,  $Q_C=8$  л/с,  $Q_n=6$  л/с. Определить требуемую отметку уровня воды в водонапорном баке  $z_6$ , если свободный напор  $H_{св} > 10$  м.

### Решение

Потери напора на отдельных участках ([4], с. 215)

$$h_{ni} = A_{kvi} k_i l_i Q_i^2,$$

где значения удельных сопротивлений  $A_{kvi}$  и поправочных коэффициентов  $k_i$  определим, используя таблицы их значений из справочника [3] в зависимости от материала стенок трубы.

УЧАСТОК 1.

Расход воды

$$Q_1 = Q_A + Q_n + Q_B + Q_C = 4 + 6 + 2 + 8 = 20 \text{ л/с.}$$

По табл. 3.4 для стальной водогазопроводной трубы  $d_{y1}=150$  мм находим удельное сопротивление  $A_{kv1}=33,94$  (с/м<sup>3</sup>)<sup>2</sup> и расчетный внутренний диаметр  $d_1=155$  мм.

Скорость потока

$$V_1 = \frac{4Q_1}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0,02}{3,14 \times 0,155^2} = 1,13 \text{ м/с.}$$

По таблице 3.5 для стальной неновой трубы при скорости  $V_1=1,13$  м/с находим поправочный коэффициент  $k_1=1,011$ .

Тогда потери напора потока

$$h_{n1} = 33,94 \times 1,011 \times 260 \times 0,02^2 = 3,57 \text{ м.}$$

УЧАСТОК 2.



Расход воды

$$Q_2 = Q_1 - Q_A - 0,5Q_{\Pi} = 20 - 4 - 0,5 \times 6 = 13 \text{ л/с.}$$

Удельное сопротивление и расчетный диаметр для  $d_{y2}=125\text{мм}$ ,  $A_{\text{кв}2}=86,22 \text{ (с/м}^3\text{)}^2$ ;  $d_2=130 \text{ мм}$ .

Скорость потока

$$V_2 = \frac{4 \times 0,013}{3,14 \times 0,130^2} = 1,06 \text{ м/с.}$$

Поправочный коэффициент  $k_2=1,021$ .

Потери напора потока

$$h_{n2} = 86,22 \times 1,021 \times 180 \times 0,013^2 = 2,80 \text{ м.}$$

УЧАСТОК 3.

Расход воды  $Q_3 = Q_c = 8 \text{ л/с}$

Удельное сопротивление и расчетный диаметр для  $d_{y2}=100\text{мм}$ ,  $A_{\text{кв}3}=281,3 \text{ (с/м}^3\text{)}^2$ ;  $d_3=104 \text{ мм}$ .

Скорость потока  $V_3 = \frac{4 \times 0,008}{3,14 \times 0,104^2} = 1,02 \text{ м/с.}$

Поправочный коэффициент  $k_2=1,027$ .

Потери напора потока

$$h_{n3} = 281,3 \times 1,027 \times 210 \times 0,008^2 = 3,88 \text{ м.}$$

Требуемые напоры в узловых точках  $H \geq Z + H_{\text{св}}$ , т.е.

$$H_A^3 \geq 116 + 10 = 126 \text{ м, } H_B^3 \geq 120 + 10 = 130 \text{ м, } H_C^3 \geq 120 + 10 = 130 \text{ м.}$$

Отметку уровня воды в водонапорном баке  $Z_6$  можно определить, исходя из требуемого напора в самой дальней точке сети С:

$$z_6^3 \geq H_c + \sum_{i=1}^3 h_{ni} = 120 + 3,57 + 2,80 + 3,88 = 130,25 \text{ м.}$$

В этом случае напоры в узловых точках А и В

$$H_A = z_6 - h_{n1} = 130,25 - 3,57 = 126,68 \text{ м} > 126 \text{ м;}$$

$$H_B = H_A - h_{n2} = 126,68 - 2,80 = 123,88 \text{ м} < 130 \text{ м;}$$

Требуемый напор в точке В ( $H_B \geq 130 \text{ м}$ ) не обеспечивается, следовательно, отметка уровня воды в водонапорном баке  $Z_6$  должна быть выше, чем  $130,25 \text{ м}$  ( $Z_6 > 130,25 \text{ м}$ ). Ее определим исходя из требуемого напора воды в самой высокой точке сети В:

$$z_6 = H_B + h_{n1} + h_{n2} = 130 + 3,57 + 2,80 = 136,37 \text{ м.}$$

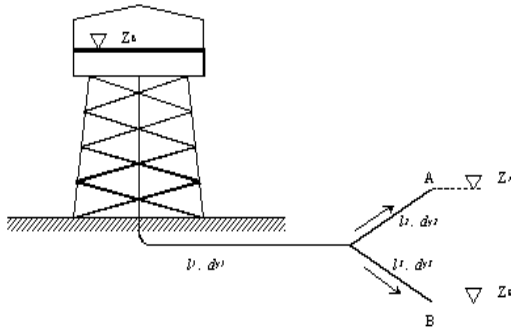
В этом случае напоры в узловых точках А и С

$$H_A = z_{\bar{\sigma}} - h_{n1} = 136,37 - 3,57 = 132,8 \text{ м} > 126 \text{ м};$$

$$H_C = H_A - h_{n2} = 130 - 3,88 = 126,12 \text{ м} < 120 \text{ м};$$

Следовательно, при отметке уровня воды в водонапорном баке  $z_{\bar{\sigma}} \geq 136,37$  м напоры воды во всех точках равны требуемым (точка *B*) или больше их (точки *A* и *C*).

## Расчет потоков в сложных трубопроводах



Водонапорная башня с уровнем воды в баке на отметке  $z_6$  подает воду к двум потребителям: А (расход  $Q_A$ , отметка  $z_A$ ) и В (расход  $Q_B$ , отметка  $z_B$ ) по разветвленному трубопроводу из напорных труб диаметром и длиной по участкам соответственно  $d_{yi}$  и  $l_i$ . При расчете использовать понятие “модуль расхода трубы  $K$ ”.

Известно, что трубы неновые чугунные  $d_{y1}=150$  мм,  $l_1=200$  м,  $d_{y2}=100$  мм,  $l_2=120$  м,  $d_{y3}=125$  мм,  $l_3=110$  м,  $z_A=16$  м,  $z_B=17$  м. Определить расходы  $Q_A$  и  $Q_B$ , если  $z_6=28$  м.

### Р е ш е н и е

Искомые расходы определяем путем решения системы из двух уравнений ([4], с 222).

$$\left. \begin{aligned} z_6 - z_A &= \frac{(Q_A + Q_B)^2}{K_1^2} l_1 + \frac{Q_A^2}{K_2^2} l_2; \\ z_6 - z_B &= \frac{(Q_A + Q_B)^2}{K_1^2} l_1 + \frac{Q_B^2}{K_3^2} l_3. \end{aligned} \right\}$$

По справочнику [3] в табл. 3.4 находим модули расхода труб по участкам для квадратичной области сопротивления и расчетные диаметры труб:  $K_{KB1}=164$  л/с,  $K_{KB2}=56,5$  л/с,  $K_{KB3}=101,8$  л/с.  $d_1=152,4$  мм,  $d_2=102$  мм,  $d_3=127,2$  мм.

Приняв в первом приближении квадратичную область сопротивления ( $K=K_{KB}$ ), получим систему уравнений следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} 28-16 &= \frac{(Q_A + Q_B)^2}{164^2} \times 200 + \frac{Q_A^2}{56,5^2} \times 120; \\ 28-17 &= \frac{(Q_A + Q_B)^2}{164^2} \times 200 + \frac{Q_B^2}{101,8^2} \times 110, \end{aligned} \right\}$$

т.е.

$$\left. \begin{aligned} 12 &= 0,00744 \times (Q_A + Q_B)^2 + 0,0376 Q_A^2; \\ 11 &= 0,00744 \times (Q_A + Q_B)^2 + 0,0106 Q_B^2. \end{aligned} \right\}$$

Вычитая второе уравнение из первого, найдем связь между расходами  $Q_A$  и  $Q_B$ :

$$1=0,0376Q_A^2-0,0106Q_B^2, \text{ тогда } Q_A=\sqrt{\frac{1+0,0106Q_B^2}{0,0376}}.$$

Подставив последнее выражение в первое уравнение системы, получим уравнение

$$Q_B^2+3,816Q_B\sqrt{1+0,0106Q_B^2}=537,41,$$

Решение которого возможно только приближенным способом. Воспользуемся графо-аналитическим методом решения.

Примем  $Q_B^{(1)}=10$  л/с, тогда

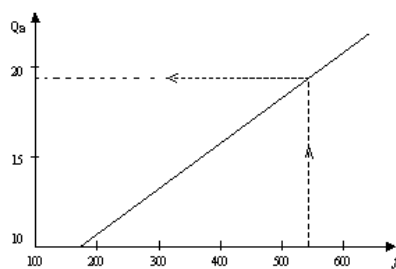
$$f(Q_B)=10^2+3,816\times 10\sqrt{1+0,0106\times 10^2}=154,77<537,4.$$

Примем  $Q_B^{(2)}=20$  л/с  $> Q_B^{(1)}$ , тогда

$$f(Q_B)=20^2+3,816\times 20\sqrt{1+0,0106\times 20^2}=574,7>537,4.$$

Примем  $Q_B^{(3)}=15$  л/с  $< Q_B^{(2)}$ , тогда

$$f(Q_B)=15^2+3,816\times 15\sqrt{1+0,0106\times 15^2}=330,31<537,41.$$



Построим вспомогательный график. По графику для  $f(Q_B)=537,41$  находим  $Q_B=19,2$  л/с.

Проверка:

$$f(Q_B)=19,2^2+3,816\times 19,2\sqrt{1+0,0106\times 19,2^2}=530,95.$$

Ошибку  $a=\frac{537,41-530,92}{537,41}\times 100=1,20\%$  считаем допустимой.

Следовательно,

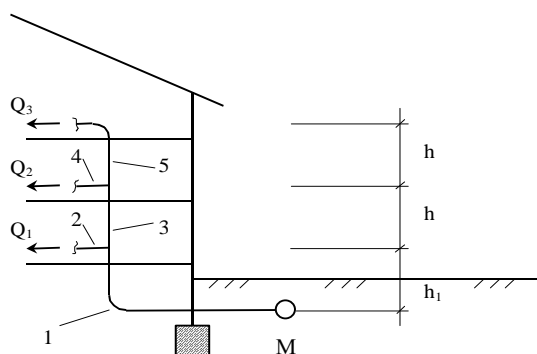
$$Q_A=\sqrt{\frac{1+0,0106\times 19,2^2}{0,0376}}=11,42 \text{ л/с.}$$

Скорости потоков воды по участкам трубопровода

$$V_1=\frac{(11,42+19,2)\times 10^{-3}\times 4}{3,14\times 0,152^2}=1,73 \text{ м/с; } V_2=\frac{11,42\times 10^{-3}\times 4}{3,14\times 0,102^2}=1,45 \text{ м/с;}$$

$$V_3=\frac{19,2\times 10^{-3}\times 4}{3,14\times 0,127^2}=1,56 \text{ м/с.}$$

Для неновых чугунных напорных труб при скорости  $V > 1,2 \text{ м/с}$  наблюдается квадратичная область сопротивления ([3], табл. 3.5). В противном случае следует уточнить значения модулей расхода ( $K = K_{\text{кв}} \cdot n$ ) и повторить расчет.



Вода подается в трехэтажное здание из магистральной сети  $M$  по разветвленному трубопроводу, состоящему из пяти участков ( $d_i, l_i, \lambda_i, \zeta_i$ ).

Известно, что  $d_1=25$  мм,  $d_2=d_4=d_5=15$  мм,  $d_3=20$  мм,  $l_1=25$  м,  $l_2=l_4=2$  м,  $l_3=3$  м,  $l_5=5$  м,  $\lambda=0,03$ ,  $\zeta_1=1,2$ ,  $\zeta_2=\zeta_4=3,1$ ,  $\zeta_3=0,8$ ,  $\zeta_5=3,6$ ,  $h_1=1,8$  м,  $h=3$  м. Определить напор  $H$  (м. вод. ст.) в магистрали  $M$ , необходимый для подачи на каждый этаж расхода  $Q \geq 0,2$  л/с.

### Решение

При подаче воды на 3-й этаж в количестве  $Q_3 \geq 0,2$  л/с расходы воды на 2-м ( $Q_2$ ) и 1-м ( $Q_1$ ) этажах будут больше ( $Q_3$ ). Потребный напор в магистрали (по уравнению Бернулли [ 4 ], с. 223).

$$H = h_1 + 2h + (\zeta_5 + \lambda \frac{l_5}{d_5}) \frac{Q_3^2 \times 16}{2g\pi^2 d_5^4} + (\zeta_3 + \lambda \frac{l_3}{d_3}) \times \frac{(Q_3 + Q_2)^2 \times 16}{2g\pi^2 d_3^4} +$$

$$+ (\zeta_1 + \lambda \frac{l_1}{d_1}) \times \frac{(Q_3 + Q_2 + Q_1)^2 \times 16}{2g\pi^2 d_1^4} = 1,8 + 2 \times 3 + (3,6 + 0,03 \times \frac{5}{0,015}) \times$$

$$\times \frac{(0,2 \times 10^{-3})^2 \times 16}{2 \times 9,81 \times 3,14^2 \times 0,015^4} + (0,8 + 0,3 \times \frac{3}{0,02}) \times \frac{[(0,2 + Q_2) \times 10^{-3}]^2 \times 16}{2 \times 9,81 \times 3,14^2 \times 0,024^4} +$$

$$+ (0,8 + 0,3 \times \frac{3}{0,02}) \times \frac{[(0,2 + Q_2) \times 10^{-3}]^2 \times 16}{2 \times 9,81 \times 3,14^2 \times 0,024^4} +$$

$$+ (1,2 + 0,03 \times \frac{25}{0,025}) \times \frac{[(0,2 + Q_2 + Q_1)]^2 \times 16}{2 \times 9,81 \times 3,14^2 \times 0,025^4}$$

т.е.

$$H = 7,8 + 0,889 + 2,74(0,2 + Q_2)^2 + 6,61(0,2 + Q_2 + Q_1)^2.$$

Расход  $Q_2$  найдем из условия равенства потребных напоров на 4-м и 5-м участках ([ 4 ], с.221 )

$$h + (\zeta_5 + \lambda \frac{l_5}{d_5}) \frac{Q_3^2 \times 16}{2g\pi^2 d_5^4} = (\zeta_4 + \lambda \frac{l_4}{d_4}) \frac{Q_2^2 \times 16}{2g\pi^2 d_4^4},$$

т.е.

$$3 + 0,889 = (3,1 + 0,03 \times \frac{2}{0,015}) \times \frac{(Q_2 \times 10^{-3})^2 \times 16}{2 \times 9,81 \times 3,14^2 \times 0,015^4} = 11,6 \times Q_2^2$$

Отсюда

$$Q_2 = \sqrt{\frac{3,889}{11,6}} = 0,579 \text{ л/с.}$$

Расход  $Q_1$  найдем из условия равенства потребного напора на 2-м участке сумме потребных напоров на 3-м и 5-м участках:

$$\begin{aligned} (\zeta_2 + \lambda \frac{l_2}{d_2}) \times \frac{Q_1^2 \times 16}{2g\pi^2 d^4} = 2h + (\zeta_5 + \lambda \frac{l_5}{d_5}) \times \frac{Q_3^2 \times 16}{2g\pi^2 d_5^4} + \\ + (\zeta_3 + \lambda \frac{l_3}{d_3}) \times \frac{(Q_2 + Q_3)^2 \times 16}{2g\pi^2 d_3^4}, \end{aligned}$$

т.е.

$$11,6 \times Q_1^2 = 2 \times 3 + 0,889 + 2,74(0,2 + 0,579)^2 = 8,551.$$

Отсюда

$$Q_1 = \sqrt{\frac{8,551}{11,6}} = 0,859 \text{ л/с.}$$

Искомый напор в магистральной сети

$$H = 7,8 + 0,889 + 2,74(0,2 + 0,579)^2 + 6,61(0,2 + 0,579 + 0,859)^2 = 28,06 \text{ м}$$

### Список используемой литературы

1. Тужилкин А.М, Злобин Е.К, Бурдова М.Г., Белоусов Р.О. Гидравлика: учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017, 266 с. – 200 экз.
2. Земцов, В.М. Гидравлика : учеб.пособие для вузов / В.М.Земцов;под ред. Ю.В.Брянской .— М. : АСВ, 2007 .— 352с. : ил. — Библиогр.в конце кн. — ISBN 978-5-93093-510-3 : 181.82. 15экз.
3. Курганов А.М. , Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник / Под общ. ред. А.М.Курганова. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л.: Стройиздат, 1986. - 440 с.
4. Тужилкин А.М., Бурдова М.Г., Механика жидкости и газа: Учебное пособие. ТулГУ. Тула 1998. – 283 с.