

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра «Экология и энергоэффективность в техносфере»

Р. Н. ВОСТРОВА

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНОГО
ТРУБОПРОВОДА В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

**Учебно-методическое пособие
для студентов строительного и заочного факультетов**

Гомель 2017

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и энергоэффективность в техносфере»

Р. Н. ВОСТРОВА

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*Одобрено учебно-методической комиссией строительного факультета
в качестве учебно-методического пособия
по выполнению расчетно-графической работы № 1
для студентов строительных специальностей*

Гомель 2018

УДК 556.536 (075.8)
ББК 30.123
В78

Рецензент – д-р техн. наук, профессор кафедры «Архитектуры промышленных и гражданских сооружений» *И. Г. Малков* (УО «БелГУТ»)

Воробьев С.А., Вострова, Р. Н.

В78 Гидравлический расчет напорного трубопровода в системе водоснабжения, построение напорной и пьезометрической линий : учеб.-метод. пособие / Р. Н. Вострова, ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 62 с.
ISBN 978-985-554-556-0

Рассмотрены теоретические основы гидравлического расчета напорного трубопровода, даны исходные данные для выполнения расчетно-графической работы. Предназначено для студентов, обучающихся по строительным специальностям.

УДК 556.536 (075.8)
ББК 30.123

ISBN 978-985-554-556-0

© Вострова Р. Н., 2018
© Оформление. УО «БелГУТ», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Состав и объем расчетно-графической работы	4
2 Исходные данные	5
3 Основные сведения для проведения расчетов	11
3.1 Подбор диаметра самотечной трубы или сифона (вариант А и В)	13
3.2 Определение действительного перепада уровней в I и II резервуаре (вариант заданий А и В)	16
3.3 Порядок выполнения гидравлического расчета напорного трубопровода насосной установки (вариант заданий А и В).....	
3.3.1 Определение диаметра всасывающего трубопровода насосной установки	
3.3.2 Определение высоты установки центра насоса над линией свободной поверхности.....	
3.3.4 Определение диаметра нагнетательного трубопровода насосной установки.....	
3.3.5 Определение потерь напора в нагнетательном трубопроводе...	20
3.4 Определение потребного напора насосной установки.....	21
3.5 Графическое построение напорной и пьезометрической линии.....	25
Список литературы	60
Приложение А.	62
Приложение В.	62

ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-графическая работа «Гидравлический расчет напорного трубопровода» по дисциплине «Механика жидкости и газа» выполняется студентами специальности 70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» в третьем семестре обучения. Гидравлический расчет системы водоснабжения производится с целью выбора диаметра трубопровода, определения скоростей и расходов в системе водоснабжения, потерь напоров, а также для определения требуемого напора трубопровода, работающего на данную систему водоснабжения.

Определив полные напоры на участке системы водоснабжения, можно построить напорную и пьезометрическую линии, которые позволяют определить давление на любом участке водопровода, а также напор и скорость в любом его сечении. Гидравлический расчет напорных трубопроводов позволяет осуществить подбор энергоэффективного оборудования для подачи воды от источника до потребителя.

Целью работы является закрепление знаний, полученных студентами при изучении теоретического материала, выработка у них навыков практического применения этих знаний при решении инженерных задач.

1 СОСТАВ И ОБЪЕМ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

В расчетно-графическую работу входит гидравлический расчет напорного трубопровода с самотечным и сифонным водозаборами и напорного трубопровода тупиковой сети с водонапорной башней.

Расчетно-графическая работа состоит из пояснительной записки с включенными в нее результатами расчетов и чертежа, на котором схематически изображается трубопровод, и наносятся линии полного и пьезометрического напоров, а также указываются все составляющие потери напора.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В вариантах заданий приняты следующие обозначения:

- l_1 – длина самотечной трубы (задание А), м;
- d_1 – диаметр самотечной трубы (задание А), мм;
- h_1 – разность горизонтов в канале I и колодце II, м;
- Q – производительность насоса, л/с;
- $l_{вс}$ – длина всасывающей трубы насоса, м;

h_2 – высота установки центра насоса над линией свободной поверхности, м;
 l_n – длина напорного трубопровода, м;
 d_n – диаметр напорного трубопровода, мм;
 d – диаметр внешнего цилиндрического насадка (задание А), мм;
 $d_{вс}$ – диаметр всасывающей трубы насоса (задание А), мм;
 l – общая длина сифона (задание В), м;
 l_1 – длина сифона от входного сечения до наивысшей точки О (задание В), м;
 H – отметка горизонта воды в резервуаре III над центром насоса, м;
 h_0 – отметка наивысшей точки сифона О (задание В), м;
 p_0 – избыточное давление в резервуаре III (задание В), м.вод.ст.;
 $p_{вак}$ – давление на входе в насос, ат;
 $h_{вак}$ – допустимый вакуум со всасывающей трубе и сифоне (задание В), м.вод.ст.;

Задание А. Гидравлический расчет напорных трубопроводов с самотечным водозабором (рисунок 1).

Из канала I по самотечной трубе АВ (снабженной фильтром и обратным клапаном) длиной l_1 и диаметром d_1 вода под напором h_1 перетекает в прибрежный колодец II.

Из прибрежного колодца II центробежный насос V перекачивает воду в открытый резервуар. Всасывающая труба насоса длиной $l_{вс}$ снабжена фильтром с обратным клапаном и имеет два поворота с отношением радиуса поворота к диаметру трубы $\frac{R}{d_{вс}} = 6,0$. Давление во всасывающем трубопроводе на входе в насос $h_{вак}$.

Далее по напорному трубопроводу вода длиной l_n и диаметром d_n вода поступает в резервуар III. Материал трубопроводов – сталь.

Из резервуара III вода перетекает в резервуар IV через внешний цилиндрический насадок диаметром d под действием напора h_3 .

В задании необходимо определить: диаметр сифона; разность уровней в канале I и колодце II; проверить возможность подъема воды в сифоне на заданную высоту; определить высоту установки центра насоса; вычислить разность горизонтов резервуаров III и IV и определить мощность насосной установки; построить напорную и пьезометрическую линии для всех участков напорных трубопроводов.

Данные для расчета напорного трубопровода с самотечной трубой приведены в таблице 1.

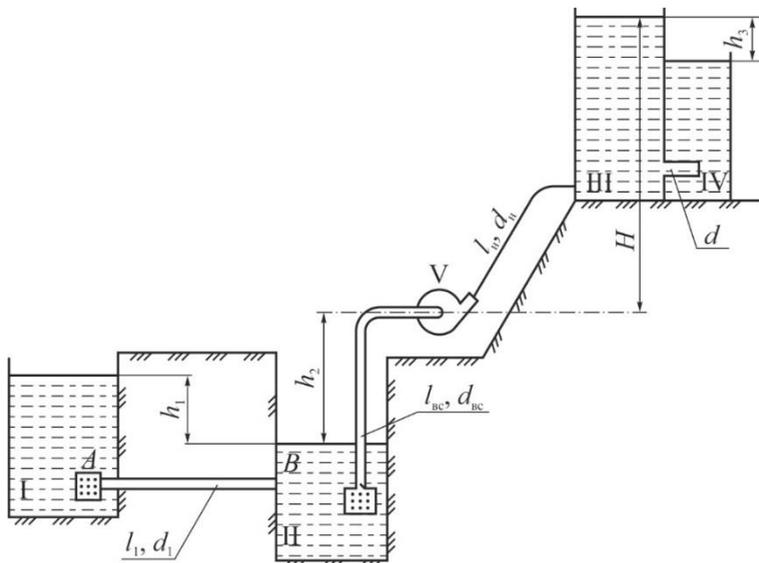


Рисунок I - Расчетная схема напорных трубопроводов самотечным водозабором

Таблица 1 - Данные для расчета напорного трубопровода с самотечной трубой

Вариант	Q	l	h_2	h_1	l_1	l_n	d_n	H	d	$p_{\text{вак}}$
1	50	20	2,0	0,31	25	112	200	15	71	0,1
2	55	25	2,5	0,41	28	115	200	16	70	0,2
4	65	35	2,7	0,46	30	120	200	18	60	0,15
5	70	40	2,8	0,47	41	140	250	9	59	0,25
6	75	45	2,9	0,48	42	145	250	10	58	0,17
7	80	21	3,0	0,49	43	147	250	11	57	0,12
8	85	22	3,1	0,5	50	150	300	12	56	0,3
9	90	23	3,2	0,32	51	155	300	13	55	0,1
10	45	24	3,3	0,33	52	186	200	14	54	0,2
11	40	26	4,3	0,34	53	187	200	25	72	0,15
12	43	27	4,4	0,35	54	188	200	26	73	0,25
13	48	28	4,5	0,36	55	189	200	27	74	0,17
14	49	31	4,6	0,37	56	190	200	28	75	0,12
15	81	29	4,7	0,57	57	191	300	29	76	0,3
16	84	44	4,8	0,56	58	195	300	30	77	0,1
17	82	54	4,9	0,55	49	193	300	31	110	0,2
18	66	64	5,0	0,54	48	192	250	32	120	0,1
19	67	61	4,2	0,53	47	195	250	33	130	0,2

20	87	63	4,1	0,52	46	180	300	34	150	0,15
21	77	33	4,0	0,51	45	175	300	35	61	0,25
22	71	32	3,9	0,4	44	170	300	36	62	0,17
23	72	41	3,8	0,39	40	165	300	37	63	0,12
24	73	42	3,7	0,38	39	160	300	38	64	0,3
25	44	43	3,6	0,44	38	135	200	39	66	0,1
26	38	53	3,5	0,43	37	130	200	40	67	0,2
27	39	55	3,4	0,42	35	125	200	41	68	0,15
28	50	20	2,0	0,3	25	110	200	20	100	0,25
29	55	30	3,0	0,4	30	120	200	30	100	0,17
30	60	20	4,0	0,5	35	130	250	40	70	0,12
31	65	30	4,5	0,55	40	140	300	35	120	0,3
32	20	95	5,1	0,21	39	101	200	25	54	0,1
33	21	84	4,4	0,31	46	123	200	43	69	0,15
34	22	92	3,8	0,27	30	152	200	33	64	0,25
35	23	83	2,9	0,4	45	122	200	40	70	0,17
36	24	85	2,0	0,55	36	153	200	52	57	0,12
37	25	82	4,7	0,26	20	131	200	29	71	0,3
38	26	93	3,7	0,32	31	154	200	20	63	0,1
39	27	81	4,5	0,54	21	120	200	18	72	0,2

Задание В. Гидравлический расчет напорных трубопроводов с сифонным водозабором (рисунок 2).

Из канала I по сифону (снабженному фильтром и обратным клапаном) длиной l и диаметром d вода под напором h_1 перетекает в прибрежный колодец II. Высота подъема воды по сифону h_0 .

Из прибрежного колодца II центробежный насос V перекачивает воду в открытый резервуар. Всасывающая труба насоса длиной $l_{вс}$ снабжена фильтром с обратным клапаном и имеет два поворота с отношением радиуса поворота к диаметру трубы $\frac{R}{d_{вс}} = 6,0$. Давление во всасывающем трубопроводе на входе в насос $h_{вак}$.

Далее по напорному трубопроводу длиной l_H и диаметром d_H вода поступает в резервуар III, находящийся под избыточным давлением p_0 . материал трубопроводов – сталь.

Из резервуара III вода перетекает в резервуар IV через отверстие диаметром $d_{отв}$. под действием напора h_3 .

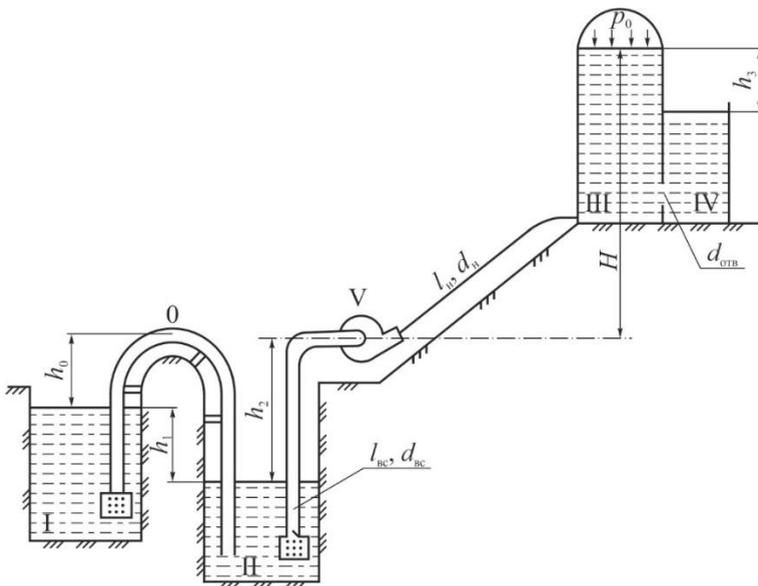


Рисунок 2 - Расчетная схема напорных трубопроводом с сифонным водозабором

В задании необходимо определить: диаметр сифона; разность уровней в канале I и колодце II; проверить возможность подъема воды в сифоне на заданную высоту h_0 ; определить высоту установки центра насоса h_2 , если давление на входе в насос $p_{\text{вак}} = 0,1$ ат.; вычислить разность горизонтов резервуаров III и IV h_3 и определить мощность насосной установки для всех участков напорных трубопроводов.

Данные для расчета напорного трубопровода с сифонным водозабором приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Данные для расчета напорного трубопровода с сифонным водозабором

Вариант	Q	$d_{\text{вс}}$	$d_{\text{свс}}$	h_1	l	h_0	l_1	l_H	d_H	H	p_0	h_3	$h_{\text{вак}}$	$d_{\text{отв}}$
1	51	24	250	0,51	21	4	10	100	200	11	20	2	8	71
2	56	25	250	0,52	22	4	11	100	200	12	20	2	8	70
3	58	33	250	0,53	23	4	12	100	200	13	20	2	8	60
4	72	34	350	0,43	24	4	13	110	300	14	20	2	7	59
5	71	35	350	0,44	20	5	14	112	300	15	20	2	7	58
6	65	37	350	0,45	12	5	7	110	300	16	30	4	7	57

7	66	36	350	0,46	14	5	7	152	300	17	30	4	7	56
8	70	38	350	0,47	16	5	8	152	300	18	30	4	7	55
9	67	39	350	0,48	18	4	9	100	300	20	30	4	7	54
10	69	40	350	0,54	18	5	9	100	300	20	30	4	7	72
11	68	28	350	0,55	28	4	14	110	300	20	25	2	7	73
12	73	41	350	0,56	29	4	14	110	300	20	25	2	7	74
13	61	42	350	0,57	30	4	15	116	300	20	30	2	7	75
14	74	43	350	0,58	20	4	10	116	300	20	30	2	7	76
15	75	29	350	0,59	18	5	9	120	300	19	30	3	7	77
16	76	44	350	0,49	18	5	9	110	300	20	20	3	8	110
17	77	32	350	0,60	18	4	9	120	300	21	20	4	8	120
18	62	31	350	0,60	15	4	8	140	300	20	20	4	8	130
19	78	45	350	0,50	20	6	10	115	300	29	20	2	8	150
20	79	46	350	0,54	20	6	10	115	300	30	20	3	8	61
21	80	30	350	0,55	20	6	10	115	300	28	20	3	8	62
22	63	47	300	0,42	20	4	10	115	250	19	20	3	8	63
23	81	48	350	0,41	20	4	10	115	300	18	20	3	8	64
24	64	49	300	0,63	20	4	10	140	250	15	20	4	8	66
25	82	50	350	0,62	27	4	12	140	300	14	20	4	8	67
26	60	27	300	0,61	26	4	12	120	250	13	20	2	7	68
27	59	26	300	0,60	25	4	13	120	250	12	20	2	7	100
28	78	30	250	0,51	30	4	10	100	200	11	20	1	7	100
29	80	30	300	0,50	28	5	10	100	200	12	20	1	8	70
30	85	25	300	0,60	21	4	10	100	200	13	20	2	8	120
31	60	25	250	0,70	22	4	15	120	200	14	20	2	7	54
32	70	30	300	0,55	23	5	15	115	200	15	20	2	8	69
33	55	20	250	0,56	28	5	12	100	200	10	20	2	8	64
34	51	21	250	0,21	20	4	9	101	200	11	15	1	7	70
35	60	30	250	0,36	35	4	18	114	200	23	22	2	8	57
36	68	44	250	0,31	30	4	14	124	200	16	29	1	7	71
37	79	23	300	0,37	44	4	20	107	250	24	30	3	8	63
38	69	31	250	0,40	36	4	18	115	200	36	18	2	7	72

3 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Гидравлический расчет содержит как расчет коротких трубопроводов, так и расчет длинных трубопроводов. К коротким трубопроводам относятся самотечная труба, сифон, всасывающая труба насоса.

Простым трубопроводом называют трубопровод, по которому жидкость транспортируется без промежуточных ответвлений.

При расчетах простого трубопровода используется уравнение Бернулли, составленное для потока жидкости от плоскости свободной поверхности питающего резервуара до плоскости выходного сечения трубопровода. Уравнение Бернулли справедливо для установившегося плавноизменяющегося движения. Уравнение Бернулли составляется с учётом получения одного неизвестного; если это невозможно, то в качестве второго используют уравнение неразрывности потока.

С помощью уравнения Бернулли решается задачи в следующей последовательности:

1. Выбирают два сечения по длине потока 1-1 и 2-2, таким образом, чтобы для одного из них были известны величины p , v , g , а для другого сечения один или несколько параметров подлежали определению.

2. Намечают линию сравнения так, чтобы были известны z_1 и (или) z_2 .

3. При двух неизвестных для второго сечения используют уравнение неразрывности движения жидкости $v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$.

3. Решают уравнения относительно неизвестного.

Все физические величины в расчетах должны приводиться в Международной системе единиц (СИ).

Для двух произвольных сечений 1-1 и 2-2 потока идеальной жидкости уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = const \quad (1.1)$$

Так как сечения 1-1 и 2-2 взяты произвольно, то полученное уравнение можно переписать иначе:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H = const \quad (1.2)$$

и прочитать так: сумма трех членов уравнения Бернулли для любого сечения потока идеальной жидкости есть величина постоянная.

С энергетической точки зрения каждый член уравнения представляет собой определенные виды энергии: z_1 и z_2 - удельные энергии положения, характеризующие потенциальную энергию в сечениях 1-1 и 2-2; $\frac{p_1}{\rho g}$ и $\frac{p_2}{\rho g}$ - удельные энергии давления, характеризующие потенциальную энергию давления в тех же сечениях;

$\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ - удельные кинетические энергии в тех же сечениях.

Следовательно, согласно уравнению Бернулли, *полная удельная энергия идеальной жидкости в любом сечении постоянна.*

Уравнение Бернулли можно истолковать и чисто геометрически. Дело в том, что каждый член уравнения имеет линейную размерность. Глядя на рисунок 3.12, можно заметить, что

z_1 и z_2 - геометрические высоты сечений 1-1 и 2-2 над плоскостью сравнения;

$\frac{p_1}{\rho g}$ и $\frac{p_2}{\rho g}$ - пьезометрические высоты;

$\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ - скоростные высоты в указанных сечениях.

В этом случае уравнение Бернулли можно прочесть так: *сумма геометрической, пьезометрической и скоростной высоты для идеальной жидкости есть величина постоянная.*

При движении реальной вязкой жидкости возникают силы трения, на преодоление которых жидкость затрачивает энергию. В результате полная удельная энергия жидкости в сечении 1-1 будет больше полной удельной энергии в сечении 2-2 на величину потерянной энергии.

Потерянная энергия или потерянный напор обозначаются $h_{\text{пот}}^{1-2}$ и имеют также линейную размерность.

Уравнение Бернулли для реальной жидкости имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_{\text{пот}}^{1-2} = H = \text{const}, \quad (1.3)$$

где $h_{\text{пот}}^{1-2}$ - потеря напора, м.

V_1, V_2 – средняя по живому сечению скорость, м/с.

Из рисунка 4 видно, что при движении жидкости от сечения 1-1 до сечения 2-2 потерянный напор все время увеличивается (вертикальная штриховка). Таким образом, уровень первоначальной энергии, которой обладает жидкость в первом сечении, для второго сечения будет складываться из четырех составляющих: геометрической высоты, пьезометрической высоты, скоростной высоты и потерянного напора между сечениями 1-1 и 2-2.

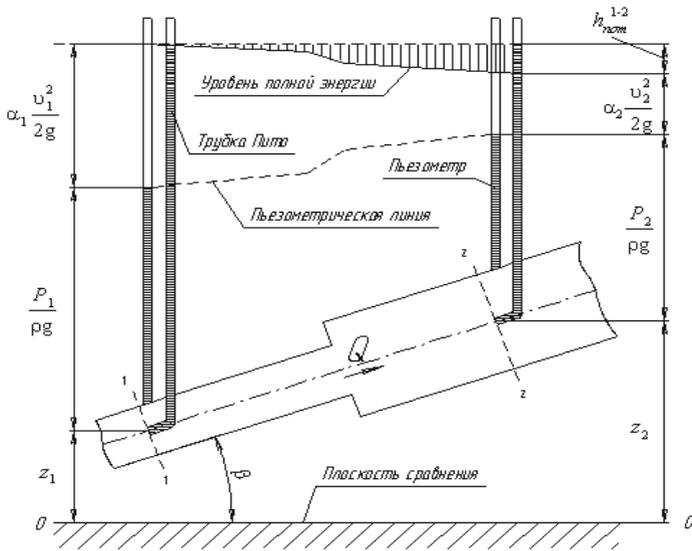


Рисунок 3 – Геометрический смысл уравнения Бернулли

Два коэффициента α_1 и α_2 называются коэффициентами Кориолиса и зависят от режима течения жидкости ($\alpha = 2$ для ламинарного режима, $\alpha = 1$ для турбулентного режима).

Потерянный напор $h_{\text{пот}}^{1-2}$ складывается из линейных потерь, вызванных силой трения между слоями жидкости, и потерь, вызванных местными сопротивлениями (изменениями конфигурации потока)

$$h_{\text{пот}}^{1-2} = h_{\text{пот}} + h_{\text{м}} \quad (1.4)$$

где $h_{\text{пот}}$ - потери напора по длине, м.

$h_{\text{м}}$ - потери на местные сопротивления, м.

$$h_{\text{пот}} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (1.5)$$

где λ - коэффициент гидравлического трения, который для ламинарного потока вычисляется по выражению:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (1.6)$$

Где Re – число Рейнольдса, которое служит для определения режимов движения жидкости.

Ламинарным называется слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсации скорости и давления.

Турбулентным называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений.

Переход от ламинарного режима к турбулентному наблюдается при определенной скорости движения жидкости. Эта скорость называется *критической* $V_{кр}$.

Значение этой скорости прямо пропорционально кинематической вязкости жидкости и обратно пропорционально диаметру трубы.

$$V_{кр} = \frac{\nu}{d} k, \quad (1.7)$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

k - безразмерный коэффициент;

d - внутренний диаметр трубы, м .

Входящий в эту формулу безразмерный коэффициент k , одинаков для всех жидкостей и газов, а также для любых диаметров труб. Этот коэффициент называется *критическим числом Рейнольдса* $Re_{кр}$ и определяется следующим образом:

$$Re_{кр} = \frac{V_{кр} d}{\nu}. \quad (1.8)$$

Для труб круглого сечения $Re_{кр}$ примерно равно 2320. Критерий подобия Рейнольдса позволяет судить о режиме течения жидкости в трубе. При $Re < Re_{кр}$ течение является ламинарным, а при $Re > Re_{кр}$ течение является турбулентным.

Развитое турбулентное течение в трубах устанавливается лишь при Re примерно равно 4000, а при $Re = 2300 \dots 4000$ имеет место переходная, критическая область.

Коэффициент гидравлического сопротивления трубопроводов можно определить при помощи уравнений (1.6, 1.9-1.12) или при помощи графика Никурадзе (рисунок 5).

Режим движения жидкости напрямую влияет на степень гидравлического сопротивления трубопроводов. Если число Рейнольдса лежит в диапазоне $4000 < Re < 10 \left(\frac{d}{\Delta_3}\right)$ коэффициент λ определяется по полуэмпирической формуле Блазиуса

$$\lambda_r = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}. \quad (1.9)$$

Во второй области, расположенной между линий II и пунктирной линией справа (рисунок 5). Коэффициент λ зависит одновременно от двух параметров - числа Re и относительной шероховатости $\frac{\Delta}{r_0}$, которую можно заменить на Δ_3 . Для определения коэффициента λ в этой области может служить также универсальная формула А.Д. Альтшуля:

$$\lambda_r = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (1.10)$$

где Δ_3 - эквивалентная абсолютная шероховатость, м [1].

Характерные значения Δ_3 (в мм) для труб из различных материалов приведены в ПРИЛОЖЕНИИ А:

Третья область - область больших Re и $\frac{\Delta}{r_0}$, где коэффициент λ не зависит от числа Re , а определяется лишь относительной шероховатостью (область расположена справа от пунктирной линии). Это *область шероховатых труб*, в которой все линии с различными шероховатостями параллельны между собой. Эту область называют областью автомодельности или режимом квадратичного сопротивления, т.к. здесь гидравлические потери пропорциональны квадрату скорости.

Определение λ для этой области производят по упрощенной формуле Шифринсона:

$$\lambda_r = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25} \quad (1.11)$$

или по формуле Прандтля - Никурадзе:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_r}} = -2 \log \left(\frac{\Delta_3}{3,71d} \right). \quad (1.12)$$

Коэффициент внутреннего гидравлического трения можно также определить при помощи графика Никурадзе (рисунок 5).

Потери напора, определяемые по формуле Вейсбаха-Дарси, можно определить, зная коэффициент гидравлического сопротивления, который определяется в зависимости от числа Рейнольдса Re и от эквивалентной шероховатости Δ_3 (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Потери напора на местные сопротивления определяются в зависимости от вида местного сопротивления по общему уравнению Вейсбаха

$$h_{\text{росш}} = \zeta \frac{v_1^2}{2g}. \quad (1.13)$$

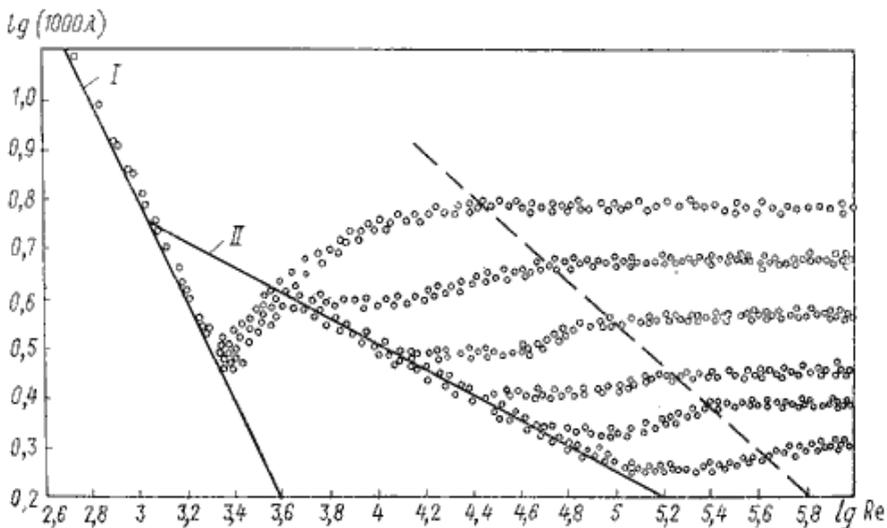


Рисунок 4 - График Никурадзе

Полная потеря напора в случае внезапного сужения определится по формуле

$$h_{\text{суж}} = \zeta_{\text{суж}} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (1.14)$$

где коэффициент сопротивления для сужения трубопровода определяется по полуэмпирической формуле И.Е. Идельчика [1]:

$$\zeta_{\text{суж}} = 0,5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) = 0,5 \left(1 - \frac{1}{n}\right), \quad (1.15)$$

где $n = \frac{S_1}{S_2}$ - степень сужения.

При выходе трубы из резервуара больших размеров, когда можно считать, что $\frac{S_1}{S_2} = 0$, а также при отсутствии закругления входного угла, коэффициент сопротивления $\zeta_{\text{суж}} = 0,5$.

Коэффициент сопротивления отвода $\zeta_{\text{отв}}$ (плавного поворота трубопровода) зависит от отношения $\frac{R}{d}$ (где R - радиус закругления трубы, d - диаметр трубы), угла поворота δ , а также формы поперечного сечения трубы.

Для отводов круглого сечения с углом поворота $\delta = 90^\circ$ и $\frac{R}{d} \geq 1$ при турбулентном течении можно воспользоваться эмпирической формулой [1]:

$$\zeta_{\text{отв}} = 0,051 + \frac{0,19d}{R}. \quad (1.16)$$

Коэффициенты местных сопротивлений трубопроводной арматуры приведены в *ПРИЛОЖЕНИИ А*.

Записав уравнение Бернулли применительно к решаемой задаче, производим решение его относительно неизвестного.

3.1 Подбор диаметра самотечной трубы или сифона (вариант А и В)

Диаметр трубопровода можно определить их таблиц [2] для гидравлического расчета водопроводных труб, зная гидравлический уклон и расход воды в сифоне или самотечной трубе (*ПРИЛОЖЕНИЕ А*).

В свою очередь средний гидравлический уклон можно определить по формуле

$$i_{\text{ср}} = \frac{h_1}{h_2}. \quad (1.17)$$

Следует принимать к сведению, что экономичные скорости v располагаются в диапазонах, отделенных более жирными линиями, а также то, что уклон берется с ближайшим меньшим значением к $i_{\text{ср}}$ [2].

3.2 Определение действительного перепада уровней в I и II резервуаре (вариант заданий А и В)

Уровень в I резервуаре считаем постоянным. Свяжем уравнением Бернулли сечения 1-1 и К-К, располагая их на уровнях свободной поверхности в I и II резервуаре соответственно, проведя линию сравнения по уровню свободной поверхности в первом резервуаре и считая равной 0 скорость в первом сечении.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_k + \frac{p_k}{\gamma} + \alpha_k \frac{v_k^2}{2g} + \sum_{i=1}^n h_{mi}. \quad (1.18)$$

где $z_1; z_k$ – ординаты, определяющие высоту положения центра выбранного сечения над горизонтальной плоскостью сравнения 0–0;

$\frac{p_1}{\gamma}; \frac{p_k}{\gamma}$ – пьезометрический напор в сечениях 1–1 и К–К;

$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}; \alpha_k \frac{v_k^2}{2g}$ – скоростной напор в сечениях 1–1 и К–К;

$\alpha_1; \alpha_k$ – коэффициенты Кориолиса, учитывающие неравномерность распределения скоростей в соответствующих живых сечениях потока;

$\sum_{i=1}^n h_{ni}$ – сумма потерь напора.

После решения уравнения, получим

$$h_{\text{действ.}} = h_m + h_l. \quad (1.19)$$

где h_l – потери напора по длине;

h_m – местные потери.

Потери напора по длине рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_i = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (1.20)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

l – длина трубопровода;

d – внутренний диаметр трубопровода;

$\frac{v^2}{2g}$ – скоростной напор в рассматриваемом участке трубопровода,

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Коэффициент гидравлического трения λ зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости $\frac{\Delta_3}{d}$, где Δ_3 – эквивалентная шероховатость. По таблице А3 (ПРИЛОЖЕНИЕ А) для заданного материала трубопровода выбираем Δ_3 , мм.

Число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (1.21)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости. Для воды при $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\nu = 0,81 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (таблица А1, ПРИЛОЖЕНИЕ А)

Если режим течения жидкости в трубопроводах турбулентный, то коэффициент гидравлического трения λ определяется по формуле Альтшуля, (формула 1.10).

Местные потери напора определяются по формуле Вейсбаха (формула 1.14).

Расчет перепада уровней в I и II резервуаре дает возможность установить действительный перепад уровней $h_{\text{действ.}}$, который отличается от заданного h_1 и соответствует выбранному диаметру сифона или самотечной трубы.

3.3 Порядок выполнения гидравлического расчета напорного трубопровода насосной установки (вариант заданий А и В)

Гидравлический расчет напорного трубопровода состоит в определении потребного напора в трубопроводе и построении его напорной и пьезометрической линий.

3.3.1 Определение диаметра всасывающего трубопровода насосной установки

Всасывающая труба представляет собой водовод от места забора воды до насоса.

Диаметр всасывающего трубопровода насоса $d_{вс}$ принимаем равным диаметру самотечной трубы или сифона $d_{вс}=d_1$, считая поток воды из прибрежного резервуара I до напорного резервуара III непрерывным, т.е. во всех напорных трубопроводах системы $Q = const$.

3.3.2 Определение высоты установки центра насоса над линией свободной поверхности

Для определения высоты расположения центра насоса над линией свободной поверхности во II резервуаре $h_2=h_{вс}$. свяжем уравнением Бернулли сечения 1-1 и 2-2, расположенные по линии свободной поверхности в резервуаре и на входе всасывающего трубопровода в насос, соответственно, линию сравнения 0-0 совместим с сечением 1-1 (рисунки 1 и 2).

Рассчитаем гидравлические потери во всасывающем трубопроводе. Потери по длине найдем, согласно уравнению Дарси-Вейсбаха (формула 1.5), определив коэффициент Дарси λ в случае ламинарного движения по формуле Дарси (формула 1.6) или в случае турбулентного движения по формуле Альтшуля (формула 1.10).

Далее рассмотрим местные сопротивления во всасывающем трубопроводе. К ним можно отнести два поворота трубопровода на 90°, сопротивление сетки фильтра и обратного клапана.

Решим уравнение относительно искомого значения высоты установки центра насоса над линией свободной поверхности $h_{вс}$:

$$h_{вс} = \frac{p_a - p_{вак}}{\gamma} - \frac{V_{вс}^2}{2 \cdot g} - \left(\lambda \cdot \frac{l_{вс}}{d_{вс}} + \zeta_{сетки} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{90^\circ} \right) \cdot \frac{V_{вс}^2}{2 \cdot g}. \quad (1.22)$$

Скорость во всасывающем трубопроводе определяем по формуле:

$$V_{\text{вс}} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{\text{вс}}^2}. \quad (1.23)$$

Определение высоты установки центра насоса над линией свободной поверхности позволяет определить геометрический напор, который является расстоянием от уровня свободной поверхности в резервуаре I до уровня свободной поверхности в резервуаре III.

$$H_{\Gamma} = h_{\text{вс}} + H \quad (1.24)$$

3.3.3 Определение потерь напора во всасывающем трубопроводе

Для определения потерь необходимо определить режим движения жидкости по трубопроводу, согласно формуле (1.21).

$$Re_{\text{вс}} = \frac{V_{\text{вс}} \cdot d_{\text{вс}}}{\nu}. \quad (1.25)$$

Тогда потери во всасывающем трубопроводе можно определить уравнением:

$$\sum h_{\text{вс}} = h_{\text{м.вс}} + h_{\text{1.вс}} = \left(\lambda \cdot \frac{l_{\text{вс}}}{d_{\text{вс}}} + \zeta_{\text{сетки}} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{90^\circ} \right) \cdot \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g}. \quad (1.26)$$

Если режим ламинарный, то коэффициент гидравлического трения λ определяем по формуле Дарси (1.8), если режим турбулентный, то по формуле Альтшуля (1.10).

3.3.4 Определение диаметра нагнетательного трубопровода насосной установки

При выборе диаметра нагнетательного трубопровода $d_{\text{н}}$ допускается соотношение:

$$d_{\text{вс}} > d_{\text{н}} \quad (1.27)$$

3.3.5 Определение потерь напора в нагнетательном трубопроводе

Нагнетательный трубопровод – длинный трубопровод. Скорость движения жидкости в нагнетательном трубопроводе

$$V_{\text{н.}} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{\text{н}}^2}. \quad (1.28)$$

Число Рейнольдса для нагнетательного трубопровода и определим режим движения жидкости в нем

$$Re_{\text{н}} = \frac{V_{\text{н.}} \cdot d_{\text{н}}}{\nu}. \quad (1.29)$$

Для длинного нагнетательного трубопровода производим расчет потерь по длине для диаметра напорного трубопровода $d_{\text{н}}$ и длины $l_{\text{н}}$. Далее рассмотрим местные сопротивления в нагнетательном трубопроводе, которые представляют собой потери по длине и потери на местные сопротивления $h_{\text{м.н.}}$, которые составляют около 10% от потерь по длине h_l в длинном трубопроводе. Тогда общие потери в напорном трубопроводе определим, согласно уравнению

$$\sum h_{\text{н.}} = h_{l.\text{н.}} + h_{\text{м.н.}} = \left(\lambda \cdot \frac{l_{\text{н.}}}{d_{\text{н}}}\right) \cdot \frac{V_{\text{н.}}^2}{2 \cdot g} + h_{\text{м.н.}} \quad (1.30)$$

Если режим ламинарный, то коэффициент гидравлического трения λ определяем по формуле Дарси (1.8), если режим турбулентный, то по формуле Альтшуля (1.10), но с учетом диаметра $d_{\text{н.}}$, скорости $V_{\text{н}}$ и длины $l_{\text{н}}$ нагнетательного трубопровода.

3.4 Определение потребного напора насосной установки

Потребным напором насосной установки называется энергия, необходимая для перемещения единицы веса жидкости от самого нижнего уровня (в месте забора) до самого верхнего (центра тяжести выходного сечения или верхнего уровня в приемном резервуаре). Потребный напор определяется по формуле

$$H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + H_{\text{дин}} \quad (1.30)$$

Где $-H_{\text{ст}}$ статический напор, учитывающий затраты энергии для подъема жидкости на высоту H_{Γ} (формула 1.23) и потерь на преодоление перепада давлений p_a и p_0 на линиях поверхности жидкости в I и III резервуарах соответственно (для варианта задания А $p_a = p_0$);

$$H_{\text{ст}} = H_{\Gamma} + \frac{(p_0 - p_a)}{\rho_0 g} . \quad (1.31)$$

$H_{\text{дин}}$ – гидравлические потери, учитывающие потери в местных сопротивлениях и потери напора по длине.

Если диаметры всасывающего и нагнетательного трубопровода одинаковы, то

$$H_{\text{дин}} = \sum h_{\text{вс}} + \sum h_{\text{н}} . \quad (1.32)$$

Если диаметры всасывающего и нагнетательного трубопровода не одинаковы, то

$$H_{\text{дин}} = \frac{v_{\text{н}}^2}{2g} + \sum h_{\text{вс}} + \sum h_{\text{н}} \quad (1.33)$$

3.5 Графическое построение напорной и пьезометрической линии

Напорная линия – это линия, соединяющая полные напоры (полную удельную энергию) в каждом сечении при графическом построении.

Пьезометрическая линия – это линия, соединяющая пьезометрические напоры в каждом сечении при графическом построении.

Замечания к построению напорной и пьезометрической линий:

1. Напорная линия для движения идеальной жидкости всегда горизонтальна. Её нужно провести прежде, чем приступить к построению напорной линии для движения реальной жидкости.

2. Анализируя изменение скорости по длине потока, откладываем вниз от напорной линии величину скоростного напора $\frac{v^2}{2g}$ и получаем пьезометрическую линию.

3. При истечении в атмосферу пьезометрическая линия всегда приходит в центр тяжести выходного сечения, так как избыточное давление на выходе в этом случае равно нулю ($p = 0$).

На миллиметровой бумаге формата А4 в масштабе 1:100 или 1:200 вычерчивается схема насосной установки с указанием всех геометрических размеров напорного всасывающего и нагнетательного трубопровода.

Весь трубопровод условно разбивается на n линейных участков, границами которых служат местные сопротивления.

На схеме трубопровода от линии свободной поверхности в резервуаре I по линии всасывающего трубопровода откладываем вниз в масштабе величину потерь на местные сопротивления $h_{м.вс}$, а на линии, проходящей через центр насоса (ниже потерь на местные сопротивления) потери по длине на всасывающем трубопроводе $h_{l.вс}$.

От полученной точки по линии, проходящей через центр насоса вверх в масштабе откладываем значение $H_{потр}$.

От полученной точки строим напорную линию, которая получается путем последовательного вычитания (по направлению потока) потерь напора на каждом из участков напорного трубопровода.

Проводим вверх вертикальную линию, перпендикулярную плоскости сравнения от центра сечения выходного отверстия напорного бака (вход трубопровода в бак III), Эта линия закончится пересечением с напорной.

Пьезометрическая линия (показывающая изменение гидростатического напора потока) строится путем вычитания скоростного напора в каждом сечении из полного напора потока, соответствующего данному сечению.

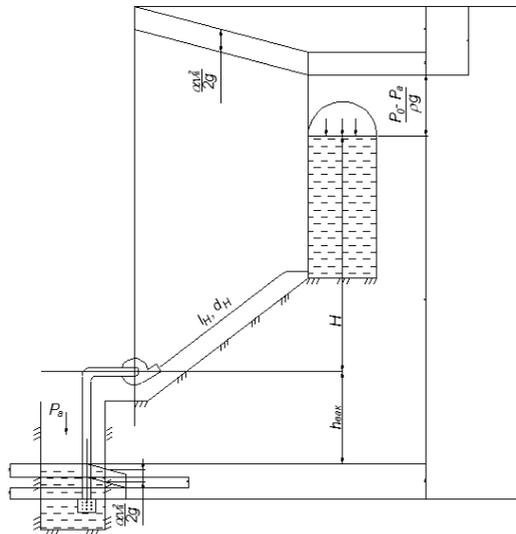


Рисунок 5 – Построение напорной и пьезометрической линий

3.6 Пример выполнения работы

Задание

В расчетно-графической работе необходимо произвести гидравлический расчет напорных трубопроводов с сифонным водозабором (схема 2).

Из канала I по сифону (снабженному фильтром и обратным клапаном) длиной l и диаметром d вода под напором h_1 перетекает в прибрежный колодец II. Высота подъема воды по сифону h_0 .

Из прибрежного колодца II центробежный насос V перекачивает воду в открытый резервуар. Всасывающая труба насоса длиной $l_{вс}$ снабжена фильтром с обратным клапаном и имеет два поворота с отношением радиуса поворота к диаметру трубы $\frac{R}{d_{вс}} * 6,0$.

Далее по напорному трубопроводу длиной l_n и диаметром d_n вода поступает в резервуар III, находящийся под избыточным давлением p_0 . Материал трубопроводов – сталь.

Из резервуара III вода перетекает в резервуар IV через отверстие диаметром $d_{отв}$ под действием напора h_3 .

В задании необходимо определить: диаметр сифона; разность уровней в канале I и колодце II; проверить возможность подъема воды в сифоне на заданную высоту h_0 ; определить высоту установки центра насоса h_2 , если давление на входе в насос $p_{вак} = 0,1$ ат.; вычислить разность горизонтов резервуаров III и IV h_3 и определить мощность насосной установки для всех участков напорных трубопроводов.

Найти гидродинамический потребный напор трубопровода, приведенного на схеме №2., построить пьезометрическую и напорную линии сифонного водозабора и всасывающего и нагнетательного трубопровода насосной установки.

Исходные данные:

$$Q = 63 \text{ л/с};$$

$$l_{вс} = 47 \text{ м};$$

$$l = 20 \text{ м};$$

$$h_1 = 0,42 \text{ м};$$

$$d_{вс} = 300 \text{ мм};$$

$$h_0 = 4 \text{ м};$$

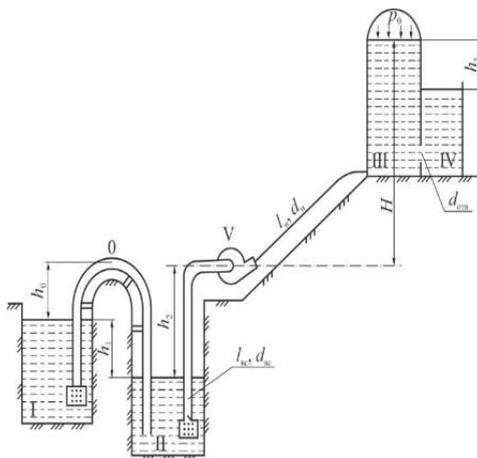
$$d_n = 250 \text{ мм};$$

$$d_{отв} = 63 \text{ мм};$$

$$l_n = 115 \text{ м};$$

$$h_3 = 3 \text{ м};$$

$$p_{вак} = 0,1 \text{ ат};$$



$$\begin{aligned}
 h_{\text{вак}} &= 8 \text{ м;} \\
 p_0 &= 20 \text{ м. вод. ат.;} \\
 l_1 &= 10 \text{ м;} \\
 H &= 19 \text{ м;} \\
 t &= 20^\circ\text{С.}
 \end{aligned}$$

Материал труб: сталь, следовательно, эквивалентная абсолютная шероховатость труб в данной задаче будет равна [1]:

$$\Delta_э = 0,1 \text{ мм} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для решения потребуется значение кинематического коэффициента вязкости для воды при $t=20^\circ\text{С}$, которое возьмем из справочника [1]:

$$\nu = 0,0101 \text{ см}^2/\text{с} = 0,101 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Трубопровод от прибрежного колодца I до II представляет собой сифон.

1 Подбор диаметра сифона

Диаметр трубопровода можно определить их таблиц [2] для гидравлического расчета водопроводных труб, зная гидравлический уклон и расход воды в сифоне или самотечной трубе (ПРИЛОЖЕНИЕ А). В свою очередь средний гидравлический уклон можно определить по формуле

$$i_{\text{ср}} = \frac{h_1}{l_1}. \quad (1)$$

Применимо к нашей схеме гидравлический уклон равен

$$i_{\text{ср}} = \frac{0,42}{20} = 0,021.$$

2 Определение действительного перепада уровней в I и II резервуаре

Уровень в I резервуаре считаем постоянным. Свяжем уравнением Бернулли сечения 1-1 и К-К, располагая их на уровнях свободной поверхности в I и II резервуаре соответственно, проведя линию сравнения по уровню свободной поверхности в первом резервуаре и считая равной 0 скорость в первом сечении.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_k + \frac{p_k}{\gamma} + \alpha_k \frac{v_k^2}{2g} + \sum_{i=1}^n h_{ni}, \quad (2)$$

где, $z_1; z_k$ – ординаты, определяющие высоты положения центра выбранного сечения над горизонтальной плоскостью сравнения 0–0;

$\frac{p_1}{\gamma}; \frac{p_k}{\gamma}$ – пьезометрический напор в сечениях 1–1 и К–К;

$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}; \alpha_k \frac{v_k^2}{2g}$ – скоростной напор в сечениях 1–1 и К–К;

$\alpha_1; \alpha_k$ – коэффициенты Кориолиса, учитывающие неравномерность распределения скоростей в соответствующих живых сечениях потока;

$\sum_{i=1}^n h_{ni}$ – сумма потерь напора.

После решения уравнения, получим

$$h_{\text{действ}} = h_m + h_l, \quad (3)$$

где h_l – потери напора по длине;

h_m – местные потери.

Потери напора по длине рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

где, λ – коэффициент гидравлического трения;

l – длина трубопровода;

d – внутренний диаметр трубопровода;

$\frac{v^2}{2g}$ – скоростной напор в рассматриваемом участке трубопровода,

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Коэффициент гидравлического трения λ зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости $\frac{\Delta_3}{d}$, где Δ_3 – эквивалентная шероховатость. По таблице А3 (ПРИЛОЖЕНИЕ А) для заданного материала трубопровода выбираем Δ_3 , мм.

Число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{(v_{\phi} \cdot d_{\phi})}{\nu}, \quad (5)$$

где, ν – кинематический коэффициент вязкости. Для воды при $t = 20^\circ\text{C}$.
 $\nu = 0,0101 \text{ см}^2/\text{с} = 0,101 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. (таблица А1, ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Местные потери напора определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \cdot \left(\frac{v}{2g}\right)^2 = (\zeta_{\text{фильтр}} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{\text{выход}}) \cdot \left(\frac{v}{2g}\right)^2, \quad (6)$$

где $\zeta_{\text{фильтра}}$, ζ_{90° , ζ_{90° , $\zeta_{\text{выход}}$ – коэффициенты местных сопротивлений, соответственно на входе трубы, повороте трубопровода на 90° и выходе трубы.

Уточнение перепада уровней в I и II резервуаре дает возможность установить действительный перепад уровней $h_{\text{действ}}$, который отличен от заданного h_1 и соответствует выбранному диаметру сифона

При заданном расходе $Q = 63 \text{ л/с}$ и гидравлическом уклоне $i_{\text{ср}} = 0,021$ по справочнику [1] определяем фактический диаметр, который равен $d_\phi = 0,25 \text{ м}$.

Зная диаметр можем рассчитать скорость в трубопроводе:

$$V_\phi = \frac{4Q}{\pi \cdot (d_\phi)^2}, \quad (7)$$

$$V_\phi = \frac{4 \cdot 63 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,25)^2} = 1,284 \text{ м/с}.$$

Определим число Рейнольдса по формуле (3):

$$Re = \frac{1,284 \cdot 0,25}{0,101 \cdot 10^{-5}} = 3,18 \cdot 10^5$$

Определим режим движения жидкости по трубопроводу. Полученные значения числа Рейнольдса трубопровода больше критического значения числа Рейнольдса, значит режим движения турбулентный.

лам. $< 2320 <$ турб.

Для турбулентного режима движения, когда число Рейнольдса $Re > 105$ коэффициент Дарси рассчитывается по формуле Шифринсона [3] или берется из таблицы А4 (Приложение А):

$$\lambda = 0,11 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta_\Sigma}{d_\phi}}, \quad (8)$$

где Δ_3 - эквивалентная абсолютная шероховатость, м [1]

$$\lambda = 0,11 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,25}} = 0,016.$$

3 Определение потерь напора в трубопроводе сифона

Потери в трубопроводе можно определить уравнением

$$\sum h_w = h_m + h_l = \left(\frac{\lambda}{d_\phi}\right) + (\zeta_{\text{фильтр}} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{\text{выхода}}) \cdot \left(\frac{V_\phi^2}{2g}\right), \quad (9)$$

$$\sum h_w = h_m + h_l = \left(\frac{0,016 \cdot 20}{0,25 + 3 + 0,2 + 0,2 + 0,5}\right) \cdot \left(\frac{1,284^2}{2 \cdot 9,81}\right) = 1,19 \text{ м.}$$

Теперь по условию необходимо проверить возможность подъема воды в сифоне на заданную высоту h_0 . Уровень в I резервуаре считаем постоянным. Свяжем уравнением Бернулли сечения 1-1 и М-М, располагая их на уровнях свободной поверхности в I и на высоте h_0 соответственно, проведя линию сравнения по уровню свободной поверхности в первом резервуаре и считая равной 0 скорость в первом сечении. Тогда уравнение (2) примет вид:

$$\frac{p_a}{\rho g} = \frac{h_0 + p_{\text{вак}}}{\rho g} + \left(\alpha + \zeta_{\text{фильтр}} + \zeta_{90^\circ} + \frac{\lambda}{d_\phi}\right) \cdot \left(\frac{V_\phi^2}{2g}\right), \quad (10)$$

$$h_0 = \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} - \left(\alpha + \zeta_{\text{фильтр}} + \zeta_{90^\circ} + \frac{\lambda}{d_\phi}\right) \cdot \left(\frac{V_\phi^2}{2g}\right),$$

$$h_0 = \left(\frac{10^5}{1000 \cdot 9,81}\right) - \left(\frac{0,1 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81}\right) - \left(1 + 3 + 0,2 + 0,016 \cdot \frac{10}{0,25}\right) \cdot \left(\frac{1,284^2}{2 \cdot 9,81}\right) = 8,76 \text{ м.}$$

По условию $h_0=4$ м, тем самым можно сделать вывод, что поднятие на высоту 4 м метра возможно.

4 Определение диаметра всасывающего трубопровода насосной установки

Диаметр всасывающего трубопровода насоса $d_{\text{вс}}$. По заданию принимаем равным $d_{\text{вс}} = 0,3$ м. Считаем поток воды из приближенного

резервуара I до напорного резервуара III непрерывным, т.е. во всех напорных трубопроводах системы $Q = const$.

5 Определение высоты установки центра насоса над линией свободной поверхности

Для определения высоты расположения центра насоса над линией свободной поверхности во II резервуаре $h_2 = h_{вс}$ свяжем уравнением Бернулли сечения 1-1 и 2-2, расположенные по линии свободной поверхности в резервуаре и на входе всасывающего трубопровода в насос.

Далее рассмотрим местные сопротивления во всасывающем трубопроводе. К ним можно отнести два поворота трубопровода на 90° , сопротивление сетки фильтра.

Решим уравнение относительно искомого значения высоты установки центра насоса над линией свободной поверхности $h_{вс}$:

$$h_{вс} = \frac{(p_a - p_{вак})}{\gamma} - \frac{V_{вс}^2}{2g} - \left(\lambda \cdot \frac{l_{вс}}{d_{вс}} + \zeta_{сетки} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{90^\circ} \right) \cdot \frac{V_{вс}^2}{2g}, \quad (11)$$

где, $p_a = 10^5$ Па - нормальное атмосферное давление, $p_{вак} = 0.1 \cdot 10^5$ Па (по заданию).

Скорость во всасывающем трубопроводе определим по формуле:

$$V_{вс} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{вс}^2} = \frac{4 \cdot 63 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0.3^2} = 0.89 \text{ м/с.}$$

Теперь определим режим движения по формуле (5):

$$Re = \frac{0.89 \cdot 3}{0.101 \cdot 10^{-5}} = 2.6 \cdot 10^5.$$

Следовательно, режим турбулентный (лам. $< 2320 <$ турбулентный режим движения).

Для турбулентного режима движения коэффициент Дарси определяется по формуле Шифринсона (8):

$$\lambda = 0,11 \cdot \sqrt[4]{\frac{0.1 \cdot 10^{-3}}{0,3}} = 0,015.$$

Для отводов круглого сечения с углом поворота $\delta = 90^\circ$ и $\frac{R}{d} = 1$ при турбулентном течении можно воспользоваться эмпирической формулой:

$$\zeta_{90^\circ} = 0,051 + \left(\frac{0,19 \cdot d}{R} \right), \quad (12)$$

Где, $\frac{R}{d}$ это отношение радиуса поворота к диаметру трубы и по условию $\frac{R}{d_{\text{вс}}} = 6,0$.

Тогда,

$$\zeta_{90^\circ} = 0,051 + \left(\frac{0,19 \cdot 1}{6} \right) = 0,11.$$

Теперь определим $h_{\text{вс}}$:

$$h_{\text{вс}} = \frac{0,8 \cdot 10^5 - 0,1 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} - \frac{0,89^2}{2 \cdot 9,81} - \frac{0,015 \cdot 47}{0,3 + 3 + 0,11 + 0,11} \cdot \frac{0,89^2}{2 \cdot 9,81} = 9,81 \text{ м}.$$

Определение высоты установки центра насоса над линией свободной поверхности позволяет определить геометрический напор, который является расстоянием от уровня свободной поверхности в резервуаре I до уровня свободной поверхности в резервуаре III.

$$H_{\Gamma} = h_{\text{вс}} + H, \quad (13)$$

$$H_{\Gamma} = 8,91 + 19 = 27,91 \text{ м}.$$

6 Определение потерь напора во всасывающем трубопроводе

Потери во всасывающем трубопроводе при турбулентном движении жидкости можно определить уравнением :

$$\sum h_{\text{вс}} = \left(\frac{\lambda \cdot l_{\text{вс}}}{d_{\text{вс}} + \zeta_{\text{фильтр}} + (\zeta_{90^\circ} + \zeta_{90^\circ})} \right) \cdot \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g}, \quad (14)$$

$$\sum h_{\text{вс}} = \left(\frac{0,017 \cdot 47}{0,3 + 3 + 3 + 0,11 + 0,11} \right) \cdot \frac{0,89^2}{2 \cdot 9,81} = 0,61 \text{ м}.$$

7 Определение диаметра нагнетательного трубопровода насосной установки

При выборе диаметра нагнетательного трубопровода $d_{\text{н}}$ допускается соотношение

$$d_{\text{вс}} \geq d_{\text{н}} \quad (15)$$

Принимаем $d_{\text{н}} = 0,25$ м (по заданию).

8 Определение потерь напора в нагнетательном трубопроводе

Нагнетательный трубопровод – длинный трубопровод. Скорость движения жидкости в нагнетательном трубопроводе

$$V_{\text{н}} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{\text{н}}^2}, \quad (16)$$

$$V_{\text{н}} = \frac{4 \cdot 63 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,25^2} = 1,284 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса для нагнетательного трубопровода и определим режим движения жидкости в нем

$$Re = \frac{V_{\text{н}} \cdot d_{\text{н}}}{\nu}, \quad (17)$$

$$Re = \frac{1,284 \cdot 0,25}{0,101 \cdot 10^{-5}} = 3,18 \cdot 10^5.$$

Определим режим движения жидкости по трубопроводу. Полученные значения числа Рейнольдса трубопровода больше критического значения числа Рейнольдса, значит режим движения турбулентный.

лам. $\langle 2320 \rangle$ турб.

Для турбулентного режима движения коэффициент Дарси определяется по формуле (8)

$$\lambda = 0,11 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,25}} = 0,016.$$

Для длинного нагнетательного трубопровода производим расчет потерь по длине для диаметра напорного трубопровода $d_{\text{н}}$ и длины $l_{\text{н}}$. Далее рассмотрим местные сопротивления в нагнетательном трубопроводе, которые представляют собой потери по длине и потери на местные

сопротивления $h_{(м.н)}$, которые составляют около 10% от потерь по длине h_l в длинном трубопроводе. Тогда общие потери в напорном трубопроводе определим, согласно уравнению:

$$\sum h_n = \left(\frac{\lambda \cdot l_1}{d_n + \zeta_{\text{выхода}} + \zeta_{90^\circ}} \right) \cdot \frac{V_n^2}{2g}, \quad (18)$$

$$\sum h_n = \left(\frac{0,016 \cdot 115}{0,25 + 0,2} \right) \cdot \frac{1,284^2}{2 \cdot 9,81} = 0,72 \text{ м.}$$

9 Определение потребного напора насосной установки

Потребным напором насосной установки называется энергия, необходимая для перемещения единицы веса жидкости от самого нижнего уровня (в месте забора) до самого верхнего (центра тяжести выходного сечения или верхнего уровня в приемном резервуаре). Потребный напор определяется по формуле

$$H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + H_{\text{дин}}, \quad (19)$$

Где, $H_{\text{ст}}$ – статический напор, учитывающий затраты энергии для подъема жидкости на высоту H_r (формула 1.23) и потерь на преодоление перепада давлений p_a и p_0 на линиях поверхности жидкости в I и III резервуарах соответственно (для варианта задания А $p_a = p_0$);

$$H_{\text{ст}} = H_r + \frac{(p_0 - p_a)}{\rho \cdot g}, \quad (20)$$

где, $H_{\text{дин}}$ – гидравлические потери, учитывающие потери в местных сопротивлениях и потери напора по длине.

$$H_{\text{ст}} = 27,91 + \frac{(2 \cdot 10^5 - 10^5)}{1000 \cdot 9,81} = 16,19 \text{ м,}$$

Так как диаметры всасывающего и нагнетательного трубопровода не одинаковы, то

$$H_{\text{дин}} = \frac{v_{\text{вс}}^2 + v_n^2}{2g} + \sum h_{\text{вс}} + \sum h_n = \frac{1,284^2 + 0,89^2}{2 \cdot 9,81} + 0,61 + 0,72 = 3,46 \text{ м.} \quad (21)$$

$$H_{\text{потр}} = 16,19 + 3,46 = 19,64 \text{ м.}$$

10 Определение разности горизонтов в резервуарах III и IV

Указанную разность можно вычислить из формулы для определения расхода жидкости:

$$Q = \mu\omega \cdot \sqrt{2gh_3}, \quad (22)$$

где, Q – расход жидкости, проходящий из резервуара III в резервуар IV, равный производительности насоса;

μ -коэффициент расхода (для истечения под уровень $\mu = 0,62$);

ω -площадь поперечного сечения;

g -ускорение силы тяжести;

h_3 -разность уровней в резервуарах.

Из формулы (19) получим:

$$\omega = \frac{d_{\text{отв}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,063^2}{4} = 0,0031 \text{ м}^2 \quad (23)$$

$$h_3 = \frac{Q^2}{(\mu\omega)^2 \cdot 2g} = \frac{(63 \cdot 10^{-3})^2}{(0,62 \cdot 0,031)^2 \cdot 9,81} = 1,26 \text{ м}, \quad (24)$$

11 Определение мощности насосной установки

Различают полезную мощность N_p , кВт, которая определяется работой насоса, совершаемой им при подъеме жидкости в единицу времени на высоту H и мощность, необходимая для приведения в действие насосной установки $N_{\text{уст}}$.

$$N_p = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{потр}}}{1000} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 63 \cdot 10^{-3} \cdot 19,64}{1000} = 12,14 \text{ кВт}. \quad (25)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. Л.: 1961. – 352 с.
- 2 Шевелев Ф.А., Шевелева А.Ф. Таблицы гидравлического расчета водопроводных труб. М.: Стройиздат, 1984. -112 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Зависимость коэффициента кинематической вязкости воды от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	7	10	12
$\nu, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,0179	0,0152	0,0143	0,0131	0,0124
$t, ^\circ\text{C}$	15	17	20	25	30
$\nu, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,0114	0,0109	0,0101	0,009	0,008

Таблица А.2 - Коэффициенты местных сопротивлений

Наименование вида местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления ζ
Вентиль с прямоточным движением жидкости	0,5 – 1
Распределительные устройства и обратные клапаны	2 – 3
Значительное расширение потока при поступлении жидкости в резервуары	0,8 – 0,9
Приемный клапан	2
Фильтр	10
Закругление трубы под 90°	0,15 – 0,25

Таблица А.3 - Эквивалентная шероховатость для труб из различного материала

Материал трубопровода	Эквивалентная шероховатость Δ_3 , мм
Стекло	0
Трубы, тянутые из латуни, свинца, меди	0...0,002
Высококачественные бесшовные стальные трубы	0,06...0,2
Стальные трубы	0,1...0,5
Чугунные асфальтированные трубы	0,1...0,2
Чугунные трубы	0,2...1,0

Таблица А 4 – Значения коэффициента гидравлического трения и модуля расхода для круглых труб, рассчитанные по формуле Павловского Н.Н. при коэффициенте шероховатости $n = 0,012$

d, мм	50	75	100	150	200	250	300	350	400
λ	0,0391	0,0349	0,0321	0,0286	0,0263	0,0247	0,0334	0,0224	0,0216
K, м ³ /с	0,0098	0,0287	0,0614	0,1794	0,3837	0,6921	1.1206	1.6842	2.3970

Продолжение табл. 1

Q, м/с	d, мм														
	80			90			100			125			150		
	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	
18,0	—	—	2,69	171,5	2,12	91,1	1,36	27,9	0,95	11,4	—	—	—	—	
18,5	—	—	2,76	181,1	2,18	96,3	1,39	29,5	0,98	12,0	—	—	—	—	
19,0	—	—	2,84	191,1	2,24	101,6	1,43	31,1	1,01	12,6	—	—	—	—	
19,5	—	—	2,91	201,2	2,30	107,0	1,47	32,8	1,03	13,2	—	—	—	—	
20,0	—	—	2,99	211,7	2,35	112,5	1,51	34,5	1,06	13,8	—	—	—	—	
20,5	—	—	3,06	222,4	2,41	118,2	1,54	36,2	1,09	14,5	—	—	—	—	
21,0	—	—	—	—	2,47	124,1	1,58	38,0	1,11	15,2	—	—	—	—	
21,5	—	—	—	—	2,53	130,0	1,62	39,8	1,14	15,8	—	—	—	—	
22,0	—	—	—	—	2,59	136,2	1,66	41,7	1,17	16,5	—	—	—	—	
22,5	—	—	—	—	2,65	142,4	1,70	43,6	1,19	17,2	—	—	—	—	

Продолжение табл. 1

Q, м/с	d, мм														
	100			125			150			180			200		
	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	v	1000 t	
23,0	2,71	149,8	1,73	45,6	33,00	2,49	98,9	1,75	37,0	46,00	2,44	71,8	—	—	
23,5	2,77	155,4	1,77	47,6	33,60	2,52	96,7	1,78	38,1	47,00	2,49	75,0	—	—	
24,0	2,83	162,0	1,81	49,7	34,00	2,56	99,7	1,80	39,2	48,00	2,54	78,2	—	—	
24,5	2,88	168,9	1,85	51,7	34,50	2,60	102,6	1,83	40,4	49,00	2,60	81,5	—	—	
25,0	2,94	175,8	1,88	53,9	35,00	2,64	105,6	1,85	41,6	50,00	2,65	84,6	—	—	
25,5	3,00	182,9	1,92	56,1	35,50	2,67	106,6	1,88	42,8	51,00	2,70	88,3	—	—	
26,0	—	—	1,96	58,3	36,00	2,71	111,7	1,91	44,0	52,00	2,76	91,8	—	—	
26,5	—	—	2,00	60,5	36,50	2,75	114,8	1,93	45,2	53,00	2,81	95,3	—	—	
27,0	—	—	2,08	62,8	37,00	2,79	118,0	1,96	46,5	54,00	2,86	98,9	—	—	
27,5	—	—	2,17	65,2	37,50	2,83	121,2	1,99	47,7	55,00	2,91	102,6	—	—	

Q, кг/с	150		175		200		250		300		350		400		450		500	
	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l						
22.5	2.34	80.6	1.66	32.4	1.43	22.0	0.95	7.61	0.61	2.56	0.43	1.06	0.31	0.50	0.244	0.271	—	—
23.0	2.36	83.1	1.68	33.4	1.45	22.6	0.96	7.83	0.62	2.64	0.44	1.09	0.310	0.51	0.246	0.278	—	—
33.5	3.41	85.7	1.71	34.4	1.48	23.3	0.98	8.06	0.63	2.71	0.44	1.12	0.32	0.53	0.25	0.285	—	—
34.0	2.45	88.3	1.72	35.4	1.50	24.0	0.99	8.27	0.64	2.78	0.45	1.15	0.329	0.54	0.255	0.293	0.200	0.162
34.5	2.48	90.9	1.76	36.5	1.52	24.7	1.01	8.50	0.65	2.86	0.454	1.18	0.33	0.56	0.26	0.301	0.195	0.166
35.0	2.51	93.5	1.79	37.5	1.54	25.5	1.02	8.73	0.66	2.94	0.46	1.21	0.336	0.57	0.263	0.309	0.205	-0.170
35.5	2.52	96.2	1.81	38.2	1.56	26.2	1.03	8.97	0.67	3.01	0.47	1.24	0.34	0.58	0.266	0.316	0.208	0.174
36.0	2.55	98.9	1.84	39.7	1.59	26.9	1.05	9.20	0.68	3.09	0.474	1.28	0.348	0.60	0.27	0.324	0.211	0.179
36.5	2.63	101.7	1.86	40.8	1.61	27.7	1.06	9.44	0.69	3.17	0.48	1.31	0.35	0.61	0.274	0.332	0.214	0.183
37.0	2.66	104.5	1.89	41.9	1.63	28.5	1.08	9.69	0.70	3.25	0.486	1.34	0.358	0.63	0.278	0.340	0.217	0.188
37.5	2.70	107.4	1.91	43.1	1.65	29.2	1.09	9.93	0.71	3.33	0.49	1.37	0.36	0.64	0.28	0.348	0.220	0.192
38.0	2.74	110.2	1.94	44.2	1.67	30.0	1.11	10.2	0.72	3.41	0.50	1.41	0.367	0.66	0.285	0.357	0.223	0.197
38.5	2.77	113.2	1.96	45.4	1.70	30.8	1.12	10.4	0.73	3.50	0.51	1.44	0.37	0.68	0.29	0.365	0.226	0.201
39.0	2.81	116.1	1.99	46.6	1.72	31.6	1.14	10.7	0.735	3.58	0.513	1.48	0.377	0.69	0.293	0.374	0.229	0.206
39.5	2.84	119.1	2.01	47.8	1.74	32.4	1.15	10.9	0.74	3.67	0.52	1.51	0.38	0.71	0.296	0.382	0.232	0.210
40.0	2.88	122.2	2.04	49.0	1.76	33.3	1.17	11.2	0.75	3.75	0.53	1.55	0.39	0.72	0.30	0.391	0.235	0.215
41.0	2.95	128.3	2.09	51.5	1.81	35.0	1.20	11.7	0.77	3.93	0.54	1.62	0.40	0.76	0.31	0.408	0.240	0.225
42.0	3.02	134.7	2.14	54.1	1.85	36.7	1.22	12.3	0.79	4.10	0.55	1.69	0.406	0.79	0.315	0.426	0.246	0.235

Продолжение табл. 11

Q, кг/с	150		175		200		250		300		350		400		450		500	
	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l								
43	2.19	56.7	1.69	36.4	1.25	12.9	0.81	4.29	0.57	1.76	0.42	0.82	0.32	0.44	0.25	0.24	0.295	0.15
44	2.24	59.3	1.94	40.3	1.28	13.5	0.83	4.47	0.58	1.84	0.425	0.86	0.33	0.46	0.258	0.25	0.301	0.156
45	2.30	62.1	1.96	42.1	1.31	14.1	0.85	4.66	0.59	1.91	0.43	0.89	0.34	0.48	0.26	0.26	0.306	0.16
46	2.35	64.8	2.03	44.0	1.34	14.7	0.87	4.85	0.61	1.99	0.44	0.93	0.345	0.50	0.27	0.28	0.312	0.168
47	2.40	67.7	2.07	45.9	1.37	15.4	0.89	5.05	0.62	2.07	0.45	0.97	0.35	0.52	0.276	0.29	0.318	0.175
48	2.45	70.6	2.11	47.9	1.40	16.0	0.90	5.25	0.63	2.15	0.46	1.00	0.36	0.54	0.28	0.30	0.320	0.18
49	2.51	73.6	2.16	49.9	1.43	16.7	0.92	5.45	0.65	2.24	0.47	1.04	0.37	0.56	0.287	0.31	0.324	0.188
50	2.56	76.6	2.20	52.0	1.46	17.4	0.94	5.66	0.66	2.32	0.48	1.08	0.38	0.58	0.29	0.32	0.328	0.195
51	2.60	79.7	2.25	54.1	1.49	18.1	0.96	5.88	0.67	2.40	0.49	1.12	0.38	0.60	0.30	0.33	0.334	0.20
52	2.65	82.9	2.29	56.2	1.52	18.8	0.98	6.09	0.68	2.49	0.50	1.16	0.39	0.62	0.305	0.34	0.349	0.209

Продолжение табл. II

Q, н/с	d, мм																	
	150		175		200		250		300		350		400		450		500	
	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l
53	2,70	86,1	2,34	86,4	1,54	19,5	1,00	6,31	0,70	2,58	0,51	1,20	0,40	0,65	0,31	0,35	0,25	0,21
54	2,75	89,4	2,38	89,6	1,57	20,3	1,02	6,54	0,71	2,67	0,52	1,24	0,405	0,67	0,317	0,37	0,258	0,22
55	2,81	92,7	2,42	92,9	1,60	21,0	1,04	6,76	0,72	2,76	0,53	1,29	0,41	0,69	0,32	0,38	0,26	0,23
56	2,86	96,1	2,47	96,2	1,63	21,8	1,05	7,00	0,74	2,86	0,54	1,33	0,42	0,71	0,328	0,39	0,268	0,238
57	2,91	99,6	2,51	99,6	1,66	22,6	1,07	7,23	0,75	2,96	0,55	1,37	0,43	0,74	0,33	0,40	0,27	0,246
58	2,96	103,1	2,56	103,4	1,69	23,4	1,09	7,47	0,76	3,05	0,56	1,42	0,435	0,76	0,34	0,42	0,277	0,25
59	3,01	106,7	2,60	106,7	1,72	24,2	1,11	7,71	0,78	3,14	0,57	1,46	0,44	0,78	0,346	0,43	0,287	0,26
60	—	—	2,64	107,4	1,75	25,0	1,13	7,96	0,79	3,24	0,58	1,51	0,45	0,81	0,35	0,44	0,297	0,269
61	—	—	2,69	111,4	1,78	25,9	1,15	8,21	0,80	3,34	0,59	1,55	0,46	0,83	0,356	0,45	0,29	0,277
62	—	—	2,73	115,4	1,81	26,7	1,17	8,46	0,82	3,44	0,60	1,60	0,465	0,86	0,36	0,47	0,296	0,265

46

Продолжение табл. II

Q, н/с	d, мм																	
	175		200		250		300		350		400		450		500		600	
	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l	v	1000 l
63	2,76	82,5	1,84	37,6	1,10	8,72	0,83	3,55	0,61	1,65	0,47	0,86	0,365	0,46	0,30	0,29	0,21	0,155
64	2,82	85,2	1,87	38,5	1,21	9,24	0,85	3,65	0,62	1,69	0,48	0,91	0,375	0,50	0,306	0,31	0,215	0,16
65	2,86	87,9	1,89	39,4	1,23	9,53	0,86	3,76	0,63	1,73	0,49	0,93	0,38	0,51	0,31	0,32	0,218	0,16
66	2,91	90,6	1,92	40,3	1,24	9,82	0,87	3,87	0,64	1,79	0,495	0,96	0,387	0,52	0,316	0,32	0,221	0,165
67	2,95	93,3	1,95	41,2	1,26	9,82	0,88	3,98	0,65	1,84	0,50	0,99	0,39	0,54	0,32	0,33	0,225	0,169
68	3,00	96,1	1,98	42,2	1,28	10,1	0,90	4,09	0,66	1,89	0,51	1,01	0,40	0,55	0,325	0,34	0,228	0,174
69	—	—	2,01	33,1	1,30	10,4	0,91	4,20	0,67	1,94	0,52	1,04	0,405	0,57	0,33	0,35	0,23	0,176
70	—	—	2,04	34,1	1,32	10,7	0,92	4,31	0,68	1,99	0,525	1,07	0,41	0,58	0,335	0,354	0,235	0,18
71	—	—	2,07	35,1	1,34	11,0	0,93	4,43	0,69	2,05	0,53	1,09	0,416	0,60	0,34	0,36	0,238	0,184
72	—	—	2,10	36,1	1,36	11,3	0,95	4,54	0,70	2,10	0,54	1,12	0,42	0,61	0,344	0,37	0,24	0,188

Продолжение табл. II

Q, π/c	d, мм																		
	200		250		300		350		400		450		500		600		700		
	φ	1000 f	φ	1000 f	φ	1000 f	φ	1000 f	φ	1000 f	φ	1000 f	φ	1000 f	φ	1000 f	φ	1000 f	
73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
78	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
83	2,42	47,9	1,56	15,1	1,09	5,92	0,80	2,73	0,62	1,45	0,467	0,79	0,397	0,48	0,279	0,203	0,21	0,105	
84	2,45	40,2	1,58	15,4	1,11	6,05	0,81	2,79	0,63	1,49	0,49	0,81	0,40	0,49	0,28	0,207	0,215	0,107	
85	2,48	39,3	1,60	15,8	1,12	6,19	0,82	2,85	0,64	1,52	0,498	0,83	0,406	0,50	0,285	0,21	0,217	0,109	
86	2,51	51,5	1,62	16,2	1,13	6,33	0,83	2,91	0,645	1,55	0,50	0,84	0,41	0,51	0,289	0,216	0,22	0,112	
87	2,54	52,7	1,64	16,6	1,15	6,46	0,84	2,96	0,65	1,58	0,51	0,86	0,416	0,52	0,29	0,22	0,222	0,114	
88	2,57	53,9	1,66	16,9	1,16	6,60	0,85	3,04	0,66	1,62	0,516	0,88	0,42	0,53	0,295	0,225	0,225	0,116	
89	2,59	55,1	1,68	17,3	1,17	6,74	0,86	3,10	0,67	1,65	0,52	0,90	0,426	0,54	0,299	0,23	0,227	0,119	
90	2,62	56,4	1,70	17,7	1,18	6,89	0,87	3,17	0,675	1,69	0,528	0,92	0,43	0,56	0,30	0,234	0,23	0,121	
91	2,65	57,6	1,71	18,1	1,20	7,03	0,88	3,23	0,68	1,72	0,53	0,94	0,435	0,57	0,305	0,239	0,232	0,123	
92	2,68	58,9	1,73	18,5	1,21	7,16	0,88	3,30	0,68	1,76	0,539	0,95	0,44	0,58	0,309	0,244	0,235	0,126	
93	2,71	60,2	1,75	18,9	1,22	7,32	0,90	3,37	0,70	1,79	0,545	0,97	0,445	0,59	0,31	0,248	0,238	0,128	
94	2,74	61,5	1,77	19,3	1,24	7,48	0,91	3,43	0,705	1,83	0,55	0,99	0,45	0,60	0,315	0,25	0,24	0,131	
95	2,77	62,8	1,79	19,7	1,25	7,64	0,92	3,50	0,71	1,86	0,557	1,01	0,454	0,61	0,319	0,258	0,243	0,133	
96	2,80	64,1	1,81	20,2	1,26	7,80	0,93	3,57	0,72	1,90	0,56	1,03	0,459	0,62	0,32	0,26	0,245	0,136	
97	2,83	65,5	1,83	20,6	1,28	7,96	0,94	3,64	0,73	1,93	0,569	1,05	0,464	0,64	0,325	0,268	0,248	0,138	
98	2,86	66,8	1,85	21,0	1,29	8,13	0,95	3,71	0,735	1,97	0,575	1,07	0,469	0,65	0,329	0,27	0,25	0,141	
99	2,89	68,2	1,86	21,4	1,30	8,30	0,96	3,78	0,74	2,01	0,58	1,09	0,47	0,66	0,33	0,278	0,255	0,143	
100	2,91	69,6	1,88	21,9	1,32	8,46	0,97	3,85	0,75	2,05	0,586	1,11	0,478	0,67	0,336	0,28	0,268	0,146	
102	2,97	72,4	1,92	22,8	1,34	8,81	0,99	4,00	0,765	2,12	0,598	1,15	0,486	0,70	0,34	0,29	0,261	0,151	
104	3,03	75,2	1,96	23,7	1,37	9,15	1,00	4,14	0,78	2,20	0,61	1,19	0,497	0,72	0,349	0,30	0,266	0,155	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Образец оформления титульного листа к расчетно-графической
работе № 1**

**Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь
Белорусский государственный университет транспорта**

Кафедра «Экология и энергоэффективность в техносфере»

**Расчетно-графическая работа №1
«Гидравлический расчет напорного трубопровода в
системе водоснабжения»**

**по дисциплине
«Механика жидкости и газа»
для специальности 1-70 04 03 Водоснабжение,
водоотведение и охрана водных ресурсов**

**Выполнил студент
группы С – 23
Иванов А.П.
Учебный шифр**

**Принял преподаватель
к.т.н., доцент Вострова Р.Н.**

**Гомель
2018**